



Universidade de Aveiro
2011

Departamento de Engenharia Civil

**RAFAEL DA COSTA
CARLOS**

**CONTRIBUTO PARA A MITIGAÇÃO DA DEPOSIÇÃO
DE SEDIMENTOS EM ALBUFEIRAS**



**RAFAEL DA COSTA
CARLOS**

**CONTRIBUTO PARA A MITIGAÇÃO DA DEPOSIÇÃO
DE SEDIMENTOS EM ALBUFEIRAS**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção de grau de Mestre em Engenharia Civil, realizado sob a orientação científica do Doutor Carlos Daniel Borges Coelho, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.

Aos meus Pais e Avós

o júri

presidente

Prof^a. Doutora Margarida João Fernandes de Pinho Lopes
Professora auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

Prof^a. Doutora Raquel Castro Alves Ferreira da Silva
Investigadora Pós-Doutoramento da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Prof. Doutor Carlos Daniel Borges Coelho
Professor auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Este trabalho resulta de diversos apoios e incentivos dados ao autor, que vem aqui agradecer de uma forma sincera.

Ao Doutor Carlos Coelho, orientador científico, pela sua presença frequente permitindo a resolução de diversos problemas, pelas valiosas sugestões, pela motivação, empenho e interesse que desde cedo colocou nesta orientação e pelas críticas construtivas que fez e tanto ensinaram.

Ao Sr. Victor Rodrigues, técnico de laboratório, e à Eng.^a Maria Carlos, pelo apoio sempre presente que prestou na elaboração dos ensaios laboratoriais.

Aos Colegas e Amigos, pela amizade, encorajamento e esclarecimentos que contribuíram para cumprir todos os objectivos desta dissertação.

Aos Pais e Avós, pelos valores transmitidos e incansável apoio ao longo dos anos, sem o qual não seria possível a minha formação como estudante e principalmente como pessoa.

A todos, o meu

MUITO OBRIGADO.

palavras-chave

Escoamento fluvial, albufeiras de barragens, deposição de sedimentos, medidas de mitigação, canal hidráulico

resumo

No âmbito desta dissertação, foram realizados estudos de caracterização da dinâmica de transporte e deposição sedimentar em escoamentos típicos de albufeiras, resultantes da instauração de barragens em cursos de água. No seguimento desta temática, avaliou-se a eficácia de medidas para controlo e mitigação dessa deposição, visando a atenuação dos respectivos efeitos nefastos.

Os estudos foram efectuados com recurso a ensaios laboratoriais no canal hidráulico do laboratório do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro. A avaliação da dinâmica de transporte e deposição foi realizada variando as condições de escoamento líquido e sólido, com posterior medição das massas de areia depositadas ao longo do canal. Foi possível verificar que, numa fase inicial dos ensaios, a deposição ocorreu essencialmente na zona de formação do ressalto hidráulico, progredindo para jusante com o tempo. Além da duração de ensaio, a localização dos depósitos dependeu essencialmente da posição do ressalto hidráulico, por sua vez influenciado pelas condições do escoamento, nomeadamente pelo caudal escoado, inclinação do fundo do canal e forma da secção transversal do canal.

Nos ensaios de avaliação das medidas de controlo e mitigação da deposição, comprovou-se a eficácia do rebaixamento total do reservatório por abertura da barragem, na passagem de sedimentos para jusante da barragem. A sucção hidráulica através de uma mangueira, também foi eficaz na remoção de sedimentos do interior do reservatório para uma local de armazenamento. Nestas duas medidas, a totalidade de sedimentos retirados ao escoamento, foi considerável quando comparada com a totalidade de sedimentos envolvidos no ensaio. O rebaixamento parcial do reservatório, por abertura do descarregador de fundo, e a canalização de sedimentos para jusante da barragem, mostraram-se inconsequentes na remoção de sedimentos da albufeira.

A compreensão das dinâmicas de transporte e deposição sedimentar numa albufeira, tal como da actuação das respectivas medidas de mitigação, são de grande importância, uma vez que ajudam no controlo dos impactos negativos gerados, nomeadamente, nos efeitos erosivos ao longo do litoral, por défice de alimentação sedimentar fluvial.

keywords

river flow, dam's reservoirs, sediment deposition, mitigation measures, hydraulic flume

abstract

In the aim of the present thesis, a characterization of the dynamics of sediment transport and deposition, in typical reservoir flows, resulting from building dams on rivers, was performed. Following this theme, measures effectiveness to control and mitigate deposition, in order to reduce its adverse effects, was evaluated.

The studies were carried out conducting laboratory tests in the hydraulic flume, at the Civil Engineering Department of Aveiro University. The evaluation of the sediments transport and deposition processes was carried out varying the liquid and solid flow conditions, with subsequent measurement of the masses of sand deposited along the flume. Initially, deposition occurred mainly in the hydraulic jump area. However, over time, the deposits formation progressed in the downstream direction. The deposits location depends mainly on the hydraulic jump position, in turn influenced by the drained flow, bottom slope and shape of the channel cross section.

The tests to evaluate the measures to control and mitigate deposition, proved the effectiveness of the reservoir emptying, by opening completely the dam, in the routing of sediments to downstream of the dam. The hydraulic suction through a hose, to remove sediments from the inside of the reservoir, to a storage location also presented good results. In these two measures, the total of sediments, removed from the runoff, was considerable when compared to the totality of sediments involved in the test. The partial drawdown of the reservoir, by opening the bottom sluices, and the channeling of sediment through a hose to downstream of the dam, were inconsequential in the removal of sediment from the reservoir.

Understanding the dynamics of sediment transport and deposition, as well as the performance of mitigation measures, have great importance in a reservoir, since they help to control the negative impacts generated, namely related to coastal erosion due to fluvial sediment transport reduction.

ÍNDICE DE CONTEÚDOS

Índice de conteúdos	i
Índice de figuras	iv
Índice de tabelas	viii
1. Introdução	1
1.1. Enquadramento	1
1.2. Motivação	3
1.3. Objectivo e estrutura	3
2. Caracterização de barragens	5
2.1. Finalidade	5
2.2. Funcionamento	6
2.3. Características da albufeira	6
2.4. Impactos associados	7
3. Assoreamento em reservatórios	9
3.1. Transporte sedimentar em reservatórios	9
3.2. Distribuição sedimentar	10
3.2.1. Depósitos de remanso	14
3.2.2. Depósitos de delta	14
3.2.3. Depósitos de fundo	16
3.3. Eficiência de retenção	17
3.4. Correntes de turbidez	19
3.5. Impactos associados ao assoreamento	19
3.5.1. Montante	20
3.5.2. Jusante	21
3.6. Situação mundial	22
4. Controlo e mitigação do assoreamento em reservatórios	25
4.1. Técnicas de redução de sedimentos afluentes	26
4.1.1. Gestão da bacia hidrográfica	26
4.1.2. Retenção de sedimentos a montante	28
4.1.3. Derivação de sedimentos	32
4.1.4. Armazenamento fora do curso de água	33
4.2. Técnicas de controlo e mitigação de sedimentação no reservatório	35

4.2.1.	Redução da deposição de sedimentos.....	35
4.2.2.	Remoção de sedimentos depositados	41
5.	Trabalhos laboratoriais	53
5.1.	Condições base	53
5.1.1.	Descrição das condições laboratoriais	53
5.1.2.	Comportamento geral do escoamento	56
5.1.3.	Ensaio padrão	59
5.2.	Ensaio de transporte e deposição sedimentar.....	66
5.2.1.	Planeamento dos ensaios	67
5.2.2.	Dimensão das areias	67
5.2.3.	Caudal líquido	69
5.2.4.	Inclinação.....	73
5.2.5.	Forma do reservatório.....	75
5.2.6.	Modo de descarga de sedimentos	77
5.3.	Ensaio das medidas de mitigação.....	80
5.3.1.	Planeamento de ensaios	80
5.3.2.	Lavagem com rebaixamento.....	81
5.3.3.	Lavagem com esvaziamento.....	84
5.3.4.	Sucção hidráulica.....	87
5.3.5.	Sifonagem.....	89
6.	Discussão de resultados	93
6.1.	Comentários e conclusões	93
6.1.1.	Ensaio de transporte e deposição sedimentar.....	93
6.1.2.	Ensaio das medidas de mitigação.....	95
6.2.	Caso de estudo 1	98
6.3.	Caso de estudo 2.....	99
6.3.1.	Transporte sólido com descarregador.....	99
6.3.2.	Transporte sólido quando sujeito a descarga de fundo.....	100
6.4.	Caso de estudo 3	101
7.	Considerações finais	103
7.1.	Conclusões.....	103
7.2.	Desenvolvimentos futuros	106
	Referências bibliográficas	109
	Anexo I – Tempo de ensaio.....	I
	Anexo II – Erro.....	II
	Anexo III – Ensaio de transporte e deposição sedimentar	III

Anexo IV – Ensaio de lavagem de sedimentos.....	IV
---	----

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Número de barragens. 1 – Total mundial; 2 – Total mundial exceptuando a China; 3 – Total da China (Wang e Hu, 2009).....	1
Figura 2.	Diferentes formas de albufeiras (Stole, 2008).....	6
Figura 3.	Diferentes configurações de albufeiras com a mesma capacidade de armazenamento (Coelho <i>et al.</i> , 2009).....	10
Figura 4.	Zonas gerais de deposição num reservatório (Morris e Fan, 1997).....	12
Figura 5.	Esquema de formação dos depósitos de sedimentos nos reservatórios (Carvalho <i>et al.</i> , 2000).....	12
Figura 6.	Padrões de deposição longitudinal de sedimentos em albufeiras (Ferreira, 2010).....	13
Figura 7.	Curvas de eficiência de retenção de sedimentos, segundo Brune (Carvalho <i>et al.</i> , 2000).....	17
Figura 8.	Curvas de eficiência de retenção de sedimentos, segundo Churchill (Carvalho <i>et al.</i> , 2000).....	18
Figura 9.	Exemplos de barreiras de controlo (Armanini <i>et al.</i> , 1991).	29
Figura 10.	Esquema com agrupamento de barreiras de controlo (Morris e Fan, 1997).....	29
Figura 11.	Exemplo de bacia de detritos em La Cañada, no condado de Los Angeles, California (Pritchard, 2010).....	30
Figura 12.	Esquema do corte transversal de uma bacia de deposição de sedimentos (Morris e Fan, 1997).....	31
Figura 13.	Sistema de passagem de sedimentos com galeria de desvio na albufeira Amsteg, no Rio Reuss, na Suíça (Batuca e Jordaan, 2000).	32
Figura 14.	Sistema de derivação de sedimentos na albufeira de Nagle, África do Sul. (Morris e Fan, 1997).....	33
Figura 15.	Esquema das metodologias de armazenamento fora do curso de água: A – Planície de inundação; B – Afluente; C – Planície de inundação (Morris e Fan, 1997).....	34
Figura 16.	Hidrograma típico do escoamento líquido e sólido durante uma cheia (Shen e Janssen, 1999).....	36
Figura 17.	Processo de rebaixamento com previsão do histograma (faseamento) (Garcia, 2007).....	38

Figura 18.	Exemplo de curva padrão a aplicar no processao de rebaixamento da albufeira (Garcia, 2007).....	39
Figura 19.	Passagem das correntes de turbidez através da barragem (Batuca e Jordaan, 2000).....	40
Figura 20.	Cone de lavagem, após aplicação da técnica de lavagem com rebaixamento (Sloff, 1991).	44
Figura 21.	Movimento dos sedimentos na albufeira, após aplicação de lavagem com rebaixamento (Wang e Hu, 2009).....	45
Figura 22.	Lavagem de sedimentos com esvaziamento (Batuca e Jordaan, 2000).....	45
Figura 23.	Secção transversal da albufeira, após lavagem com esvaziamento (Garcia, 2007)..	46
Figura 24.	Princípios de funcionamento da sifonagem de sedimentos (Batuca e Jordaan, 2000).....	47
Figura 25.	Draga hidráulica (Morris e Fan, 1997). 1 – cabeça de corte; 2 – controlos; 3 – bomba principal; 4 – motor; 5 – canalização flutuante de descarga.....	50
Figura 26.	Draga com cabo suspenso (Morris e Fan, 1997).	51
Figura 27.	Garra ou balde aberto (Agency, 1994).	51
Figura 28.	Canal hidráulico do DECivil.	54
Figura 29.	Equipamento do canal hidráulico.	54
Figura 30.	Dispositivo de simulação de barragem.	55
Figura 31.	Sistema de descarga de sedimentos.	55
Figura 32.	Esquema da divisão do canal por trechos (unidades em metros).	56
Figura 33.	Configuração do ressalto hidráulico (trecho 13).	57
Figura 34.	Deposição de sedimentos no canal hidráulico. A seta indica o sentido do escoamento.	57
Figura 35.	Pormenores dos padrões de acumulação de areias no decorrer dos ensaios.	59
Figura 36.	Curva de distribuição granulométrica representativa das areias recolhidas na Praia da Barra.....	60
Figura 37.	Distribuição da areia ao longo do canal, para diferentes tempos de ensaio.	61
Figura 38.	Padrões de deposição do delta, para diferentes tempos de ensaio. Vista de jusante para montante.	62

Figura 39.	Distribuição dos sedimentos para diferentes tempos de ensaio. Vista de montante para jusante.	63
Figura 40.	Posição do centro de massa e da frente de deposição de sedimentos, para diferentes tempos de ensaio.	64
Figura 41.	Variação da velocidade do centro de massa dos sedimentos, para diferentes tempos de ensaio.	65
Figura 42.	Distribuição da areia ao longo do canal, nas condições do ensaio padrão.	66
Figura 43.	Distribuição das areias ao longo do canal, para o ensaio de variação do d_{50}	68
Figura 44.	Distribuição das areias ao longo do canal, para os diferentes caudais ensaiados.	69
Figura 45.	Posição do centro de massa dos depósitos, para os diferentes caudais ensaiados.	70
Figura 46.	Formação de depósitos junto às paredes do canal, após a finalização dos ensaios de caudais menores. Vista de montante para jusante.	71
Figura 47.	Formação dos depósitos após a finalização dos ensaios de variação da inclinação. Vista de jusante para montante.	73
Figura 48.	Distribuição das areias ao longo do canal, para as diferentes inclinações ensaiadas.	74
Figura 49.	Modelo de alteração da forma da albufeira, no ensaio PF1.	75
Figura 50.	Modelo de alteração da forma da albufeira, no ensaio PF2.	75
Figura 51.	Distribuição das areias ao longo do canal, para as diferentes formas de albufeira ensaiadas.	76
Figura 52.	Formação dos depósitos após a realização dos ensaios de variação das formas da albufeira. Vista de jusante para montante.	77
Figura 53.	Disposição do mecanismo, para descarga de areias no centro.	78
Figura 54.	Formação dos depósitos após a finalização do ensaio de variação do modo de descarga de areias. Vista de jusante para montante.	78
Figura 55.	Distribuição das areias ao longo do canal, para os diferentes modos de descarga de sedimentos.	79
Figura 56.	Formação de depósitos após a realização dos ensaios de lavagem com rebaixamento. A seta indica a direcção do escoamento.	82
Figura 57.	Distribuição das areias ao longo do canal, para os diferentes ensaios de lavagem com rebaixamento.	82
Figura 58.	Areia passada para jusante da barragem, para os diferentes caudais de lavagem com rebaixamento.	83

Figura 59.	Esquema do funcionamento da barragem nos ensaios de lavagem com esvaziamento.	84
Figura 60.	Distribuição das areias ao longo do canal, para os diferentes ensaios de lavagem com esvaziamento.....	85
Figura 61.	Formação dos depósitos no decorrer do ensaio LEPQ11.67. Vista de montante para jusante.	86
Figura 62.	Areia passada para jusante da barragem, para os diferentes caudais de lavagem ensaiados.....	87
Figura 63.	Mecanismo de extracção de areias por sucção.	88
Figura 64.	Pormenores da montagem do mecanismo de extracção de sedimentos por sifonagem	90
Figura 65.	Pormenor da barreira instalada no canal, para realização dos ensaios de sifonagem.	90
Figura 66.	Acumulação de sedimentos e passagem sobre a barreira instalada no canal.	91
Figura 67.	Esquema da movimentação do depósito de sedimentos durante o ensaio (Ferreira, 2010).....	100
Figura 68.	Esquema do sistema usado para os ensaios laboratoriais (Bellal <i>et al.</i> , 2003)...	101
Figura 69.	Esquema da reacção morfológica de um escoamento rápido a uma subida repentina do nível de água a jusante (Bellal <i>et al.</i> , 2003).....	102

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1.	Taxa de sedimentação de reservatórios, a nível mundial (Dewals <i>et al.</i> , 2010)...	22
Tabela 2.	Taxas de sedimentação regionais (White, 2001)	23
Tabela 3.	Condições dos ensaios realizados.....	67
Tabela 4.	Resultados dos ensaios de sucção hidráulica, com a mangueira de 15 mm de diâmetro.	88
Tabela 5.	Resultados dos ensaios de sucção hidráulica, com a mangueira de 19 mm de diâmetro.	89
Tabela 6.	Resultados dos ensaios de sifonagem, com a mangueira de 15mm de diâmetro.	91
Tabela 7.	Resultados dos ensaios de sifonagem, com a mangueira de 19 mm de diâmetro.	92
Tabela 8.	Redução média das velocidades de escoamento (Coelho <i>et al.</i> , 2009).	98
Tabela 9.	Parâmetros gerais dos ensaios (Bellal <i>et al.</i> , 2003).	102
Tabela 10.	Valores da distribuição das areias ao longo do canal, para os diferentes tempos de ensaio.	I
Tabela 11.	Valor da distribuição das areias e do erro, em massa e em percentagem, ao longo do canal, para os ensaios PT60 e PT602.	II
Tabela 12.	Valores da distribuição das areias ao longo do canal, para os ensaios de transporte e deposição sedimentar.	III
Tabela 13.	Valores da distribuição das areias ao longo do canal, para os ensaios de lavagem de sedimentos.	IV

1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo procede-se ao enquadramento deste estudo no seu contexto geral, apresentando os objectivos e a motivação para a realização do trabalho.

1.1. Enquadramento

De acordo com a estimativa da International Commission on Large Dams (ICOLD), no final do século XX, os rios mundiais encontravam-se seccionados por mais de 40 000 barragens com altura superior a 15 metros ou capacidade de armazenamento superior a 1 milhão m³. Deste número, a construção de apenas 5 000 antecede o ano de 1950. As barragens de dimensões ou de armazenamento inferior foram omissas nesta estimativa. As curvas de crescimento do número de grandes barragens no mundo, entre os anos de 1950 e 2000, estão patentes na Figura 1. A China merece especial atenção no gráfico uma vez que lidera o ranking mundial com 25 800 grandes barragens, seguida dos Estados Unidos com 8 724, ex-URSS, Japão e Índia, segundo dados obtidos em 2003 (Wang e Hu, 2009). Nos Estados Unidos o número estimado de barragens pequenas é de 96 000. Admitindo uma proporção similar nos outros países entre o número de barragens pequenas e barragens grandes, existirão cerca de 800 000 barragens em todo o mundo.

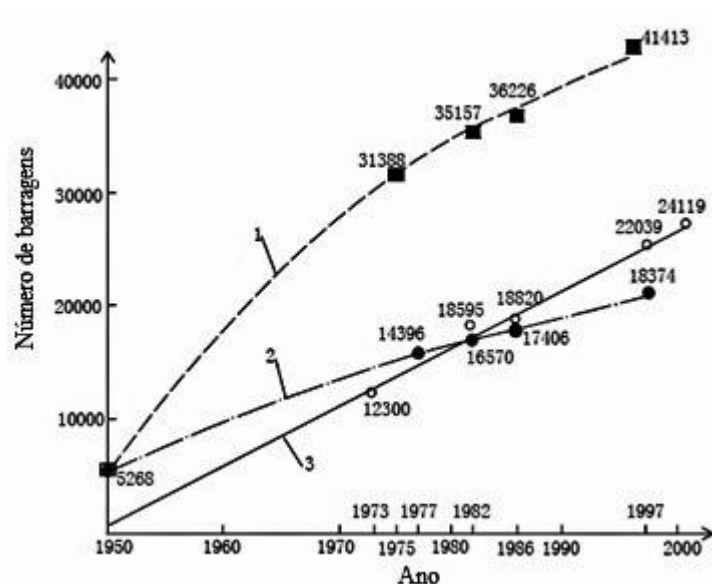


Figura 1. Número de barragens. 1 – Total mundial; 2 – Total mundial exceptuando a China; 3 – Total da China (Wang e Hu, 2009).

Durgunoglu e Singh (1993) defendem que as albufeiras resultantes de barragens são recursos naturais extremamente valiosos, podendo ser projectados para servir diversos propósitos, mais precisamente abastecimento de água, recreação, produção eléctrica, controlo de cheias, rega e navegação. Por outro lado, a construção das mesmas poderá originar distúrbios a nível social e ambiental, mesmo antes de começar a gerar benefícios. Fonseca (2002) corrobora a última citação, assegurando que as barragens são consideradas por diversos autores como os empreendimentos humanos mais destrutivos, dado que constituem barreiras físicas no curso natural dos rios.

Vários autores, entre eles Fonseca (2002) e McCartney (2009), enumeram os diversos impactos negativos inerentes à construção das barragens e respectivos reservatórios, nomeadamente no que diz respeito à libertação de gases poluentes para a atmosfera, qualidade da água, organismos e biodiversidade, regimes de escoamento natural do rio e sedimentação.

Um número considerável de autores refere que o aprisionamento dos sedimentos e consequente deposição dos mesmos a montante da barragem se deve primordialmente ao aumento da secção de vazão do rio criado pela albufeira. Este facto leva à redução da velocidade do escoamento, que por sua vez é directamente proporcional à capacidade de transporte de sedimentos. Lencastre e Franco (1992), sugerem que a generalidade dos sedimentos que se deslocam por arrastamento e as partículas de maiores dimensões transportadas em suspensão se depositam à entrada do reservatório, formando um delta. As partículas de pequena dimensão permanecem em suspensão num período mais alargado, depositando-se mais a jusante na albufeira, ao longo de todo o leito da mesma. Parte dos sedimentos de muito pequena dimensão são inclusivamente passíveis de ser transportados para jusante, através dos descarregadores existentes na barragem.

O fenómeno de deposição a montante das barragens, bem como os seus efeitos nefastos, dependem de uma série de variáveis relacionadas com a disponibilidade hídrica do rio, capacidade da albufeira, localização geográfica e topografia do sistema (Conceição, 2008).

Das consequências da deposição de sedimentos, a montante das barragens, aquela que requer maior atenção por parte dos diversos investigadores é a perda de capacidade de armazenamento do reservatório resultante do assoreamento. Este fenómeno implica uma redução ou eventual perda de utilidade do empreendimento para regular caudais e controlar cheias, abastecer populações e indústrias, e produzir electricidade (Morris e Fan, 1997). No entanto, a retenção de sedimentos induzida pelas barragens influencia de forma indirecta a erosão da orla costeira, uma vez que provoca uma redução da alimentação de caudal sólido por via fluvial. Desta maneira, este também deverá ser considerado um dos impactos nefastos

mais importantes, como referem Fonseca (2002), Lameiro e Taveira-Pinto (2009) e Ribeiro e Coelho (2009).

Batuca e Jordaan (2000) sustentam que o assoreamento das albufeiras é um processo inevitável e irreversível. No entanto, pode ser monitorizado, controlado e, definitivamente, se não for possível prevenir, poderá ser diminuído através de estratégias de gestão e/ou obras de engenharia adequadas. Existem vários relatos por todo o mundo de medidas e estratégias desenvolvidas e aplicadas, cujo principal objectivo é a preservação da vida útil do reservatório e do ambiente fluvial a montante e a jusante do mesmo. No entanto, são mínimos os relatos de medidas desenvolvidas ou aplicadas com vista à canalização de sedimentos até à foz dos rios, amenizando assim a erosão do litoral.

1.2. Motivação

O trabalho desenvolvido ao longo desta dissertação decorreu no seguimento de três trabalhos anteriores, realizados no Departamento de Engenharia Civil (DECivil) da Universidade de Aveiro. Primeiramente, Conceição (2008) estudou os efeitos das acções antropogénicas no comportamento sedimentar do rio Douro, concluindo que as barragens são a principal causa responsável pela diminuição sedimentar afluente à foz do mesmo. Por conseguinte, essa diminuição sedimentar terá uma contribuição considerável na génese dos problemas de erosão ao longo da costa. Posteriormente, Ribeiro (2009) focou o estudo no efeito das barragens no transporte sedimentar fluvial e, com base na conjugação de formulações numéricas e ensaios laboratoriais no canal hidráulico do DECivil, concluiu que o decréscimo de transporte sedimentar é consequência do aumento da altura do escoamento induzido pela albufeira e respectiva redução da velocidade do escoamento. Mais tarde, Ferreira (2010) confirmou, novamente com recurso a ensaios laboratoriais no canal hidráulico, os fenómenos de assoreamento em albufeiras e a dificuldade de avaliação dos mesmos devido a inúmeras variáveis. Focou-se essencialmente na distribuição dos sedimentos ao longo da albufeira e constatou a ineficácia de descarregadores de fundo na transposição de carga sólida para jusante do reservatório, deixando assim o campo da gestão de sedimentos aberto a futuras abordagens.

1.3. Objectivo e estrutura

O objectivo da presente dissertação passou pela continuação do estudo dos fenómenos de assoreamento em albufeiras segundo diferentes condições de escoamento, variando não só

a inclinação do leito e o caudal líquido do escoamento, mas também a forma e secção da albufeira gerada a montante.

No seguimento das teses anteriores, também as medidas de mitigação da acumulação de sedimentos em albufeiras foram alvo de avaliação neste trabalho, com especial atenção para aquelas que contribuem de certa forma para o aumento de caudal sólido a jusante do reservatório e consequente atenuação de problemas de erosão ao longo das zonas costeiras.

De forma a atingir os objectivos propostos, o documento foi organizado em sete capítulos distintos. No primeiro e actual capítulo é feita uma breve introdução à problemática abordada ao longo do documento, bem como a motivação e objectivo para a sua realização.

Nos três capítulos seguintes, é feita uma revisão bibliográfica dos principais objectos em estudo. O capítulo 2 corresponde à caracterização geral das barragens e respectivas albufeiras, enunciando os impactos que lhes estão associados. Seguidamente, no 3º capítulo, são expostos os temas que se destacam no âmbito da compreensão do assoreamento em reservatórios e da importância do seu estudo. No seguimento deste capítulo, são descritas as medidas de mitigação da deposição mais estudadas e de aplicação mais comum até ao momento.

O estudo em si, executado em laboratório, é relatado no capítulo 5. Aqui são detalhadas as metodologias usadas na execução dos ensaios de transporte e deposição sedimentar, e das medidas de mitigação, bem como os respectivos resultados obtidos. Estes resultados são discutidos no capítulo 6, onde também se faz uma breve descrição de casos de estudo com relação ao trabalho executado.

No capítulo 7 figuram as considerações finais do documento, com as principais conclusões a retirar de todo o trabalho, e a delineação de alguns aspectos que ficam em aberto para futuros desenvolvimentos.

2. CARACTERIZAÇÃO DE BARRAGENS

Batuca e Jordaan (2000) defendem que a implantação de barragens e respectivos reservatórios tem como principal objectivo recolher e armazenar água proveniente das bacias de drenagem, para mais tarde ser usada para os mais diversos propósitos.

No presente capítulo são identificados esses mesmos propósitos, efectuando-se uma alusão ao funcionamento geral das barragens, às características dos reservatórios formados a montante das mesmas e aos impactos a elas associados.

2.1. Finalidade

As barragens e respectivos lagos artificiais são construídos quando existe uma determinada exigência para tal, admitindo-se que os ganhos superam os custos e riscos. No geral, estes empreendimentos são executados para servir um ou mais propósitos. Seguidamente apresentam-se as finalidades das barragens, bem como os requisitos das respectivas albufeiras (Sloff, 1991):

- Abastecimento de água para rega, consumo doméstico e industrial. Exige um reservatório preenchido com água de boa qualidade;
- Produção eléctrica. Requer um nível de armazenamento suficiente para criar uma carga hidráulica máxima;
- Regularização de caudais para navegação ou conservação da qualidade da água. O reservatório possui uma grande capacidade de flutuação do nível hidrostático e, para tal necessita ser operado de modo a acumular água em época de cheias e libertar na época seca;
- Amortecimentos de cheias. Necessidade de um reservatório vazio;
- Recreação. Nível de água constante;
- Pesca. Requer uma albufeira com o volume morto devidamente localizado.

De acordo com Fonseca (2002), a par da grande dependência em relação ao armazenamento de água, cerca de 20% dos aproveitamentos dizem respeito à produção eléctrica, tida como uma fonte de energia renovável, tecnicamente avançada e económica. À parte a controvérsia associada à importância deste tipo de empreendimentos, tem-se assistido a um crescimento exponencial de infra-estruturas do género nos últimos anos.

2.2. Funcionamento

Em Portugal, segundo Faria (2003), as barragens podem ser agrupadas em dois grupos, de acordo com a duração de enchimento das mesmas. Existe portanto o grupo das barragens a fio-de-água, caracterizado pela duração de enchimento do reservatório inferior a 100 horas, e o grupo das barragens designadas de regularização, com um tempo de enchimento superior a 100h.

Barragens a fio-de-água são normalmente executadas apenas para produção eléctrica, uma vez que se localizam normalmente em cursos de água de declive pouco acentuado, onde em geral os caudais debitados são elevados. A capacidade de regularização de caudais é portanto baixa, dado que o caudal afluente é próximo do caudal descarregado pelo empreendimento.

As barragens de regularização podem ser operadas de forma a servir os diversos propósitos a que uma barragem está destinada, devido essencialmente à grande capacidade de amortecimento de caudais afluentes. São passíveis de armazenar água de épocas húmidas para épocas de seca, ou inclusive, de anos húmidos para anos secos, e possuem uma grande capacidade de amortecimento de caudais de ponta de cheia (Girard, 2002; Faria, 2003).

2.3. Características da albufeira

No que respeita à forma da albufeira formada a montante da barragem, esta é essencialmente influenciada pela orografia do terreno. Rocha (1998), Morris e Fan (1997) e Stole (2008) defendem que o tipo genérico de albufeira, a sua forma e o efeito na distribuição dos sedimentos, é definido em função da variação da capacidade de armazenamento com o nível de água da mesma, formando quatro categorias: lago, planície de cheia ou planície aluvial, colinear ou encosta e garganta ou vale encaixado. As quatro categorias estão ilustradas na Figura 2.

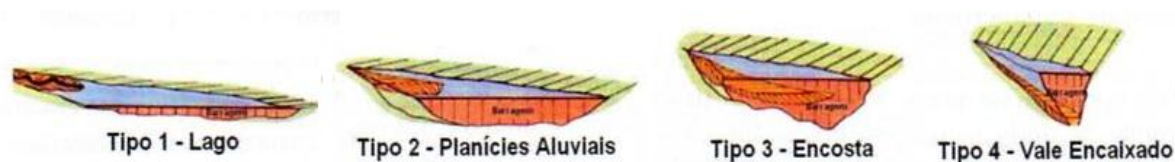


Figura 2. Diferentes formas de albufeiras (Stole, 2008).

2.4. Impactos associados

Embora não seja desprezável a importância dos reservatórios pelos múltiplos usos a que são destinados, diversos autores defendem que o seccionamento dos rios imposto pelas barragens provoca uma enorme intromissão sobre o seu sistema hidrológico, geológico e ecológico, com resultado em impactos indesejados.

De acordo com McCartney (2009), os rios existem como uma contínua ligação de escoamentos superficiais e subterrâneos e como tal, são importantes meios de transporte de energia, matéria e espécies. Assim sendo, o barramento destes cursos naturais constitui um obstáculo nas interações que nele tomam lugar, influenciando directa ou indirectamente uma miríade de factores responsáveis pelo equilíbrio da estrutura ecológica dos ecossistemas. Por vezes, tais influências manifestam-se durante dezenas ou mesmo centenas de quilómetros a jusante. Fonseca (2002) confirma, testemunhando que, vários autores consideram as barragens como os mais destrutivos empreendimentos humanos.

Fonseca (2002) e McCartney (2009) são dois dos autores que enumeram os diversos impactos inerentes ao barramento dos rios. Destacam-se os principais, nomeadamente, as emissões gasosas para a atmosfera, a deterioração da qualidade da água, o impacto a nível dos organismos e da biodiversidade, alterações no regime hidráulico e térmico do rio e no respectivo equilíbrio sedimentológico. A magnitude destes impactos depende essencialmente da dimensão da área abrangida pela albufeira, por conseguinte, será substancialmente maior naquelas de grande dimensão.

Dos principais impactos mencionados, o desequilíbrio sedimentológico provocado pelas barreiras físicas implantadas nos rios, foi o alvo de estudo da presente dissertação, uma vez que de certa forma se encontra indirectamente relacionado com a maioria dos impactos restantes e, portanto, se apresenta como o impacto mais consequente.

Não só de impactos negativos são constituídos os reservatórios, Morris e Fan (1997) asseguram que, no que toca à zona a jusante da barragem, se podem enunciar algumas vantagens. As principais ocorrem a nível ecológico, dado que as barragens reduzem o fornecimentos de determinadas substâncias nefastas, como matéria orgânica, nutrientes e poluentes, que formam ligações com as partículas mais finas do escoamento. Coker *et al.* (2009) acrescentam que, devido a fenómenos de desflorestação a montante, são fornecidas ao rio grandes quantidades de sedimentos, que acabam por ser nocivas para determinadas espécies, sensíveis a elevadas concentrações de partículas sólidas em suspensão. Nestes casos,

as barragens controlam o abastecimento de sedimentos a jusante, tornando-se benéfica para os ecossistemas em questão.

3. ASSOREAMENTO EM RESERVATÓRIOS

Neste capítulo será abordada a temática da construção de barragens e impactos que lhes são inerentes, com especial atenção no impacto a nível sedimentológico, que por sua vez será também origem de problemáticas fortemente discutidas, como a erosão costeira.

3.1. Transporte sedimentar em reservatórios

Um facto conhecido e considerado por todos os autores referenciados neste documento consiste em que os sedimentos transportados pelos rios, tendem a acumular no interior dos reservatórios. Segundo Bатуca e Jordaan (2000) e Bashar *et al.* (2010), a sedimentação em reservatórios é um processo bastante complexo que envolve arrastamento, transporte e deposição de partículas no interior da albufeira. Ainda de acordo com os últimos autores, o processo em causa é natural mas fortemente influenciado antropologicamente, tendo início aquando do barramento do rio e terminando após a albufeira se encontrar praticamente repleta de sedimentos.

Inúmeros autores descrevem o processo de transporte e deposição de sedimentos no interior dos reservatórios. Em suma, de acordo com a equação da continuidade, para um mesmo caudal, o aumento da secção transversal do curso de água, traduz-se numa redução, ou simples eliminação da velocidade de escoamento. Consequentemente, esta redução resulta numa diminuição da capacidade de transporte sólido, visto que a velocidade de escoamento é directamente proporcional ao transporte sólido total, pelo que é possível inferir que ocorre deposição de grande parte, senão de toda a carga sólida. Com efeito, estes empreendimentos são apontados como a principal causa da redução do transporte sedimentar, sendo que em Portugal essa redução se estima ascender aos 80% (Fonseca, 2002).

Segundo Conceição (2008) e Coelho *et al.* (2009), por forma a analisar devidamente o comportamento dos sedimentos quando sujeitos às circunstâncias acima indicadas, importa definir a disponibilidade hídrica do rio, capacidade do reservatório, a sua disposição geográfica e a topografia em que se insere. Assim sendo, a título de exemplo, três albufeiras com áreas diferentes, capacidades de armazenamento e características hidrométricas iguais, poderão produzir dinâmicas sedimentares completamente diferentes entre si (Figura 3).

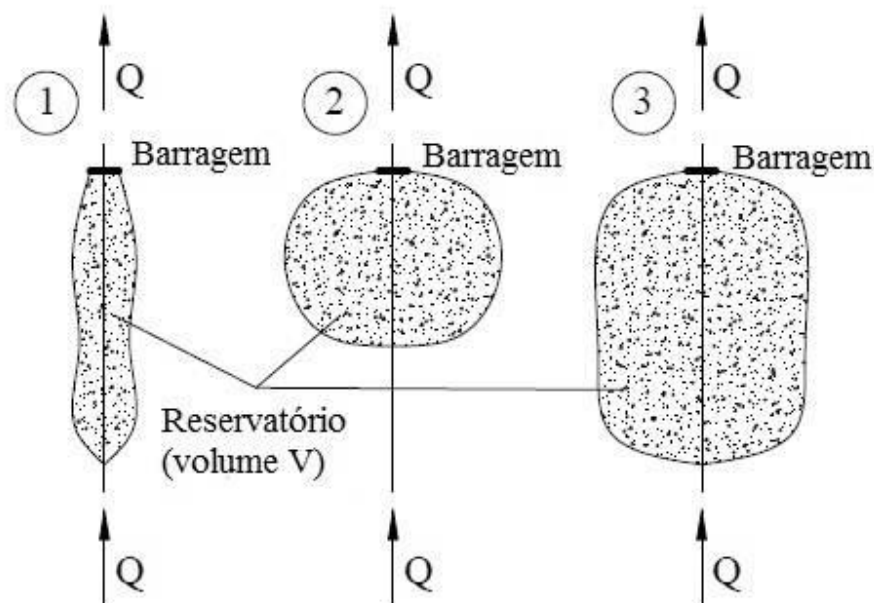


Figura 3. Diferentes configurações de albufeiras com a mesma capacidade de armazenamento (Coelho *et al.*, 2009).

Admite-se que a albufeira 1 e 2 têm a mesma profundidade (h), mas que a morfologia da primeira se assemelha mais à de um canal, uma vez que é mais alongada. Para um mesmo caudal em ambas as albufeiras, a velocidade de escoamento será superior no caso 1, visto que tem uma secção transversal de área inferior. No que respeita ao transporte e deposição dos sedimentos, estes encontram-se mais concentrados no talvegue, ao contrário do segundo caso, em que as partículas se encontram mais dispersas ao longo da secção transversal. Este facto deve-se à forma arredondada da albufeira, que provoca uma maior redução na velocidade de escoamento nessa zona menos extensa, reduzindo a capacidade de transporte ao longo do reservatório e facilitando a deposição. No reservatório 3, a altura de escoamento terá que ser menor que nos outros dois casos e o comportamento será comparável ao de um lago, com zonas de velocidade muito reduzida ou mesmo nula.

3.2. Distribuição sedimentar

Os reservatórios apresentam diferentes processos de transporte e arranjo dos sedimentos, o que provoca diferentes tipos de deposição, em diferentes locais do reservatório. Como tal, é imprescindível tratar cada situação separadamente, com vista a melhor perceber o fenómeno da deposição (Bashar *et al.*, 2010).

No interior de uma albufeira, a magnitude, o ritmo e a quantidade da deposição, bem como a distribuição dos sedimentos depositados ao longo do reservatório não ocorre de forma

homogénea, tornando este processo de difícil avaliação. De acordo com vários autores, a avaliação da distribuição dos sedimentos depende de uma vasta gama de variáveis: dimensão e natureza dos sedimentos, volume e forma da albufeira, modo de operação da mesma, disposição geográfica, topografia onde se insere, disponibilidade hídrica, taxa de transporte sólido, volume de sedimentos já depositados, etc. Conceição (2008) acrescenta que a inexistência de medições regulares de volumes sólidos transportados agrava a dificuldade da avaliação mencionada anteriormente.

O processo de deposição nos reservatórios não é uniforme, mas existe a possibilidade de estabelecer uma padronização da distribuição da carga sólida. Com efeito, Morris e Fan (1997), Coker *et al.* (2009) e Bashar *et al.* (2010) defendem que, os sedimentos mais grosseiros (areias e cascalhos), transportados por arrastamento, iniciam a deposição a partir do momento em que o curso de água entra na zona onde a influência do reservatório se faz sentir, mais concretamente na zona do ressalto hidráulico. Este processo é continuado, em larga escala, até ao momento em que a velocidade de escoamento se encontra de tal forma reduzida que a totalidade dessas partículas e inclusive algumas de dimensões mais finas, se depositam, formando um delta. Os sedimentos de menor dimensão (siltes e argilas), transportados em suspensão ou por correntes de densidade, são encaminhados para zonas mais interiores do reservatório por fluxos estratificados ou não estratificados, depositando-se de forma distribuída ao longo do fundo do reservatório e formando uma espécie de lago lamacento. Uma fracção mínima dessas partículas atinge as comportas/descarregadores da barragem, passando assim para jusante da mesma.

De acordo com Lameiro e Taveira-Pinto (2009), após a deposição os materiais grosseiros apresentam uma difícil movimentação posterior, bem como uma grande estabilidade, mantendo as suas características ao longo do tempo. Por outro lado, os sedimentos mais finos tendem a apresentar uma evolução nas suas propriedades, compactando-se com a passagem do tempo. Contudo, a recolocação em suspensão das camadas superficiais é muito mais fácil.

Tendo em conta a dinâmica de sedimentação descrita, poderão identificar-se zonas distintas de sedimentação no perfil longitudinal do reservatório. No entanto, não existe um consenso quanto à divisão destas zonas. Enquanto vários autores apenas mencionam duas zonas de deposição, o delta e a zona de deposição do leito (*bottomset bed*), Morris e Fan (1997) e Vanoni (2006) dividem o delta em duas zonas, distinguindo então três zonas de deposição (Figura 4): o *topset bed*, o *frontset bed* ou *foreset bed* e o *bottomset bed*. Por sua vez, Bатуca e Jordaan (2000) e Carvalho *et al.* (2000), classificam igualmente três zonas de

deposição, onde incluem uma zona de deposição devido ao ressalto hidráulico, denominada zona de deposição de remanso (*backwater deposition*), à qual se acrescenta a zona do delta e a *bottomset bed* (Figura 5).

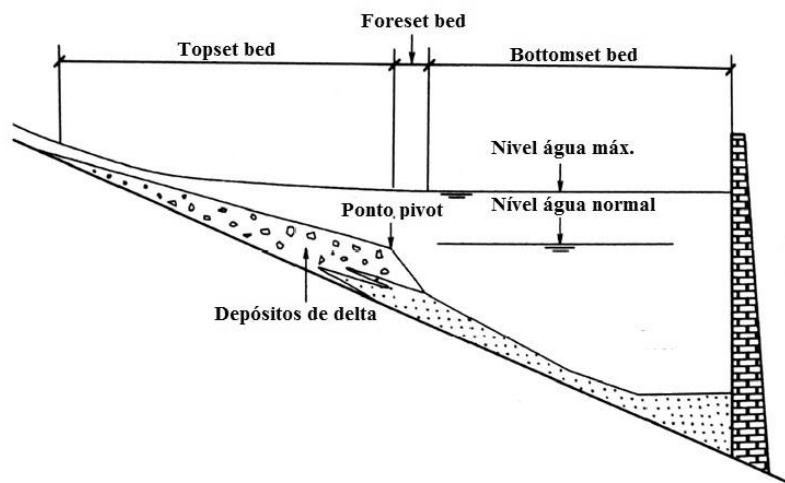


Figura 4. Zonas gerais de deposição num reservatório (Morris e Fan, 1997).

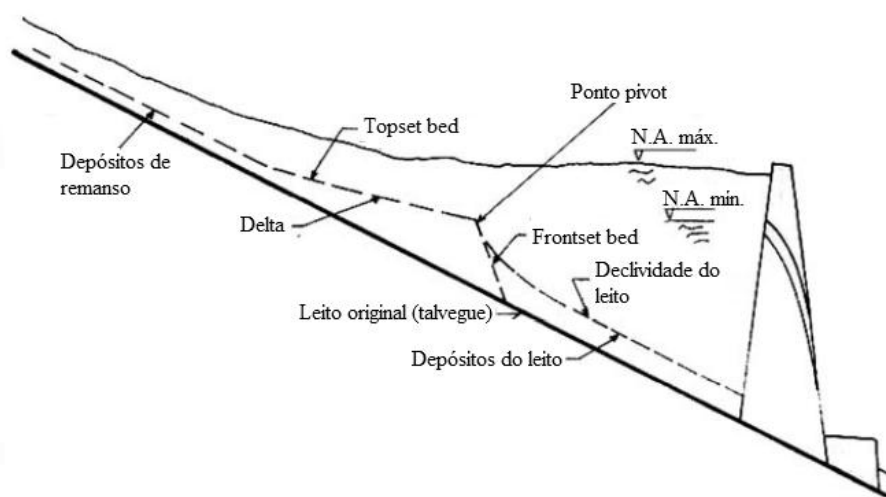


Figura 5. Esquema de formação dos depósitos de sedimentos nos reservatórios (Carvalho *et al.*, 2000).

Embora os padrões de deposição mais comuns sejam aqueles anteriormente expostos, a deposição longitudinal varia radicalmente com os diversos factores já mencionados. Logo, segundo Morris e Fan (1997), os depósitos podem adoptar quatro padrões característicos de deposição, em função das características dos sedimentos afluentes e da operação do reservatório. Os quatro tipos de deposição longitudinal encontram-se demonstrados na Figura 6 e são descritos pelos mesmos autores. No presente trabalho será analisado apenas o padrão de deposição correspondente ao da Figura 6a.

Zangh e Qian, mencionados em Sloff (1991), definiram dois tipos de formações do delta com características semelhantes a dois dos tipos de deposição longitudinal definidos por Morris e Fan (1997). O primeiro denomina-se depósitos em forma de cunha e o segundo, depósitos deltaicos. Esta distinção foi estabelecida com base em formulações empíricas realizadas em função de um mesmo intervalo de tempo, tendo em conta a capacidade média de armazenamento do reservatório, carga sólida afluente, profundidade média a jusante da barragem, desde a base dos descarregadores, e flutuação do nível hidrostático. No presente trabalho será preconizado apenas o tipo de deposição em forma de delta de Morris e Fan (1997).

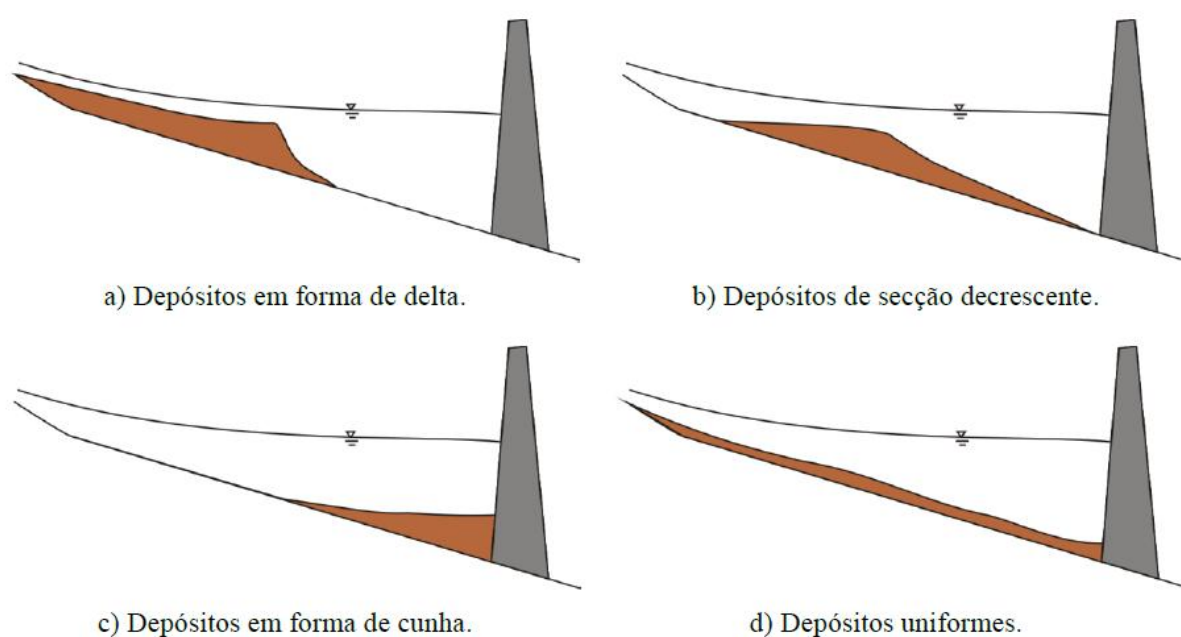


Figura 6. Padrões de deposição longitudinal de sedimentos em albufeiras (Ferreira, 2010).

No dimensionamento de uma albufeira torna-se necessário reservar um espaço destinado à acomodação de carga sólida depositada, o volume morto. Este situa-se numa região próxima da barragem, abaixo da cota mínima da tomada de água, local onde a água armazenada não será usada e os sedimentos podem ser armazenados a longo prazo sem influenciar o funcionamento do reservatório. No entanto, a deposição da maioria dos sedimentos, nomeadamente os sedimentos pertencentes ao delta, ocorre a montante do respectivo espaço, isto é, no volume de armazenamento útil do reservatório e não no volume morto (Carvalho *et al.*, 2000; Lameiro e Taveira-Pinto, 2009; Dewals *et al.*, 2010)). Este espaço armazena os depósitos de fundo e parte do delta, sendo indispensável a sua consideração no projecto de uma barragem.

3.2.1. Depósitos de remanso

Este tipo de deposição ocorre nas imediações da entrada do curso de água no reservatório, isto é, no local onde se faz sentir o efeito do ressalto hidráulico. Como já foi esclarecido anteriormente, é nesta zona que, por influência do ressalto hidráulico, ocorre o aumento da superfície hidrostática e consequente redução na velocidade de escoamento, dando início à deposição dos sedimentos mais grosseiros, até se atingir a zona de deposição correspondente ao delta, já no interior da albufeira. Assim sendo, esta divisão é considerada como a transição entre o leito do rio e o delta (Bashar *et al.*, 2010). De difícil compreensão é o fenómeno de propagação da deposição para jusante do limite do reservatório, embora Vanoni (2006) defenda que tal acontecimento se deve à evolução, igualmente para jusante, do efeito do ressalto hidráulico. Já Bashar *et al.* (2010) e Coker *et al.* (2009) defendem que o fenómeno se deve essencialmente ao facto da deposição de sedimentos provocar uma diminuição no declive do leito, que por sua vez diminuirá a velocidade, engrandecendo a deposição. No entanto, o respectivo crescimento será limitado a montante à medida que o escoamento se adapta às alterações de caudal líquido e sólido do canal, ou devido à fonte principal de sedimentos ter sido alcançada.

Bashar *et al.* (2010) acrescentam que esta zona de deposição não é fixa, avançando progressivamente na direcção do reservatório e do delta. Este facto deve-se essencialmente às flutuações do nível de água no reservatório e consequente variação das velocidades de escoamento, que erodem novamente os sedimentos depositados, transportando-os na direcção do reservatório e incorporando-os na formação do delta.

3.2.2. Depósitos de delta

De forma geral, este tipo de formação constitui a maioria dos depósitos acumulados em reservatórios hidrologicamente pequenos (razão entre a capacidade de armazenamento e o escoamento afluente abaixo dos 0.3), onde o material mais grosseiro é predominante. No entanto, quando se está perante um reservatório hidrologicamente grande, os depósitos do delta representam apenas uma pequena fracção do total de sedimentos depositados no reservatório. O facto da formação do delta ocorrer em regiões relativamente superficiais do reservatório, onde o volume de armazenamento é pequeno, não deixa de ser preocupante do ponto de vista da agração para montante (Morris e Fan, 1997; Bashar *et al.*, 2010).

Vanoni (2006) descreve o processo de formação do delta, fazendo a distinção entre os reservatórios relativamente estreitos e os amplos. No primeiro caso, o escoamento e os sedimentos mais grosseiros espalham-se de forma uniforme ao longo do lago artificial, ao passo que, no segundo caso, em que o reservatório é mais amplo, o escoamento penetra o lago de forma semelhante a um jacto, continuando ao longo desta trajectória, até a velocidade do escoamento cessar por completo. Uma porção dos sedimentos adentra o reservatório segundo esta linha de escoamento, depositando-se e formando uma espécie de cume submerso que, à medida que este processo se desenvolve, emerge e progride vários quilómetros para o interior do reservatório.

Os deltas por norma progridem para jusante podendo, em alguns casos, registar progressões significativas para montante, relacionando-se inevitavelmente com a zona dos depósitos de remanso. A esta zona de transição entre o fim dos depósitos de remanso e o início do *topset bed*, dá-se o nome de escoamento de transição ou *tail reach*, de acordo com Sloff (1991). A progressão do delta para montante está na base do rápido crescimento longitudinal do delta numa fase inicial, uma vez que a parte montante do reservatório tende a apresentar pouca profundidade e consequentemente, uma diminuída capacidade de armazenamento. O ritmo desta progressão diminui gradualmente à medida que o delta avança para zonas mais profundas e amplas do reservatório (Morris e Fan, 1997). Com efeito, o delta representa uma formação em constante mudança e reorganização, não só pelos factos acima mencionados, mas também devido às alturas em que o reservatório é mantido com baixos níveis de armazenamento ou durante descargas de cheias com grandes proporções.

Independentemente do processo de formação e de progressão, o perfil longitudinal dos deltas é sempre passível de ser dividido em duas partes distintas (Figura 4 e Figura 5), o *topset bed* e o *foreset bed*. Estas divisões apresentam características específicas e comuns a todos os deltas e variam entre si na declividade da superfície e na textura dos sedimentos. Segundo afirma Yang (2006), o ponto de transição entre ambas as divisões denomina-se ponto *pivot* e caracteriza-se por apresentar uma mudança abrupta de declive, como se pode confirmar na Figura 4 e Figura 5. Este ponto de transição varia essencialmente com o modo de operação do reservatório e com o declive do leito no local.

3.2.2.1. *Topset bed*

Como parte situada mais a montante do delta, é constituído essencialmente por sedimentos grosseiros transportados por arrastamento. Segundo Sloff (1991) e Bashar *et al.* (2010), o declive da superfície do *topset bed* é cerca de metade da inclinação do leito original

do rio e permanece constante à medida que o delta progride no reservatório, ora para montante, ora para jusante. O conhecimento do declive desta zona pode ser essencial para a determinação da progressão da sedimentação do delta e do volume de sedimentos que pode ser armazenado, assim como da consequente subida dos níveis da água em épocas de cheia (Morris e Fan, 1997).

3.2.2.2. *Foreset bed*

Zona formada após uma mudança abrupta no declive do delta, o *foreset bed* apresenta declives estimados na ordem das 6.5 vezes o declive do *topset bed*, podendo mesmo atingir declives superiores em alguns reservatórios. Geralmente, em deltas compostos por partículas mais granulares (areias e gravilha), esta zona tende a apresentar declives mais acentuados, quando comparados com a mesma zona de deltas compostos por partículas mais finas (Morris e Fan, 1997; Bashar *et al.*, 2010).

3.2.3. Depósitos de fundo

Os depósitos de fundo são constituídos por sedimentos de pequenas dimensões, como as argilas e siltes, e ocorre quando os ditos sedimentos são transportados em suspensão para o interior do reservatório, por escoamentos não estratificados ou correntes de turbidez. Contudo, Morris e Fan (1997) e Dewals *et al.* (2010) defendem que o escoamento dos afluentes, os esvaziamentos do reservatório, desabamentos e cheias de grandes proporções poderão contribuir para a presença de materiais de características mais grosseiras, dando origem a camadas de sedimentos de diferentes dimensões, ou variações localizadas dessas mesmas dimensões.

A distribuição dos sedimentos correspondentes a esta parcela é mais uniforme ao longo do leito do reservatório e ocorre entre o delta e a barragem, sendo influenciada maioritariamente pelas características dos sedimentos e características químicas da água (Vanoni, 2006; Bashar *et al.*, 2010). Sloff (1991) e Coker *et al.* (2009) referem que à medida que o fundo do reservatório é preenchido com material, ocorre uma progressiva consolidação destes sedimentos, conjugada por alterações químicas que lhe são inerentes. Estes fenómenos dão origem a uma densa camada de sedimentos, de difícil erosão e consequente nova suspensão.

3.3. Eficiência de retenção

A eficiência de retenção de um reservatório define-se como sendo a razão entre a carga sedimentar retida no reservatório e a carga total de sedimentos afluentes. Esta propriedade depende essencialmente da velocidade de queda dos sedimentos, da variedade de partículas presente no escoamento, características do escoamento através do reservatório, forma, tamanho e profundidade do reservatório, bem como o modo de operação deste (Sloff, 1991; Yang, 2006; Dewals *et al.*, 2010).

Para a obtenção deste parâmetro em barragens já erigidas, Carvalho *et al.* (2000) defendem que devem ser executadas medições sistemáticas das cargas sólidas, quer afluentes ao reservatório, quer a jusante da barragem. Nos casos de estudo a realizar antes da construção da barragem, distinguem-se dois métodos empíricos largamente utilizados e obtidos a partir de levantamentos de reservatórios existentes. Quando se pretende avaliar a eficiência de retenção de reservatórios de média e grande dimensão, utiliza-se o método desenvolvido por Brune, em 1953, enquanto para reservatórios de pequenas dimensões se adopta o método de Churchill, de 1947. Não obstante, ambos os modelos referidos, bem como todos os existentes para o cálculo da eficiência de retenção em reservatórios, podem apenas ser usados para períodos de computação de vários anos e são todos apresentados através de técnicas gráficas.

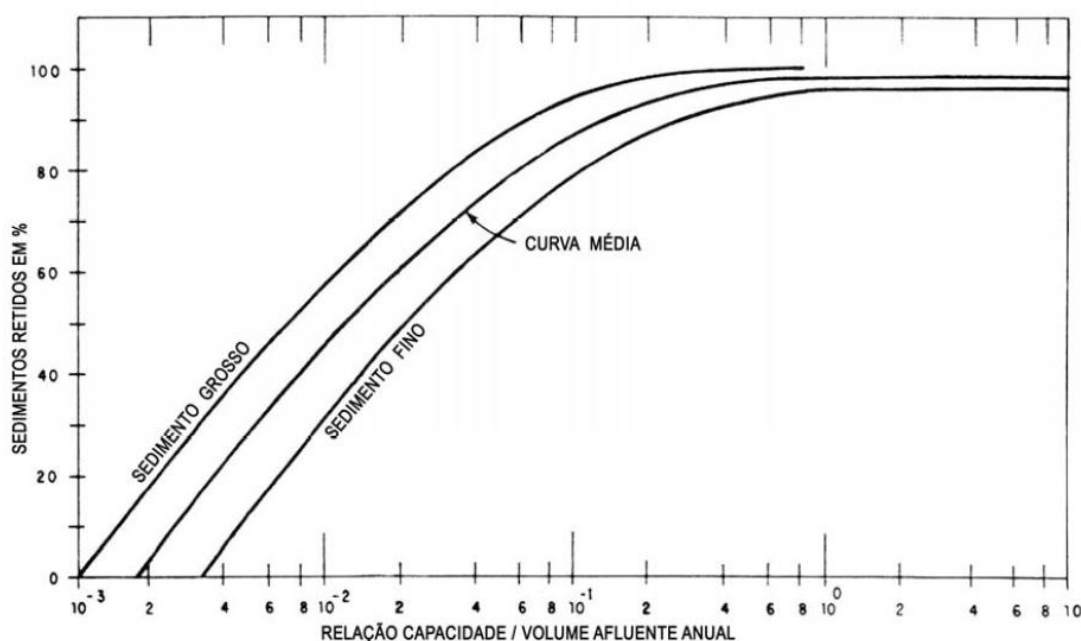


Figura 7. Curvas de eficiência de retenção de sedimentos, segundo Brune (Carvalho *et al.*, 2000).

No caso do método de Brune, apresentado no gráfico da Figura 7, o eixo das ordenadas apresenta a eficiência de retenção do reservatório em percentagem de sedimentos retidos. O eixo das abcissas, representa a capacidade de afluência que é dada pelo rácio entre a capacidade de armazenamento do reservatório e o volume afluente anual (Sloff, 1991; Morris e Fan, 1997).

Morris e Fan (1997) defendem que este método é provavelmente o mais utilizado para estimar a retenção de sedimentos em reservatórios, com resultados razoáveis tendo em conta o número limitado de dados usados, uma vez que não incluem informação sobre a forma, ou a respectiva frequência de esvaziamento.

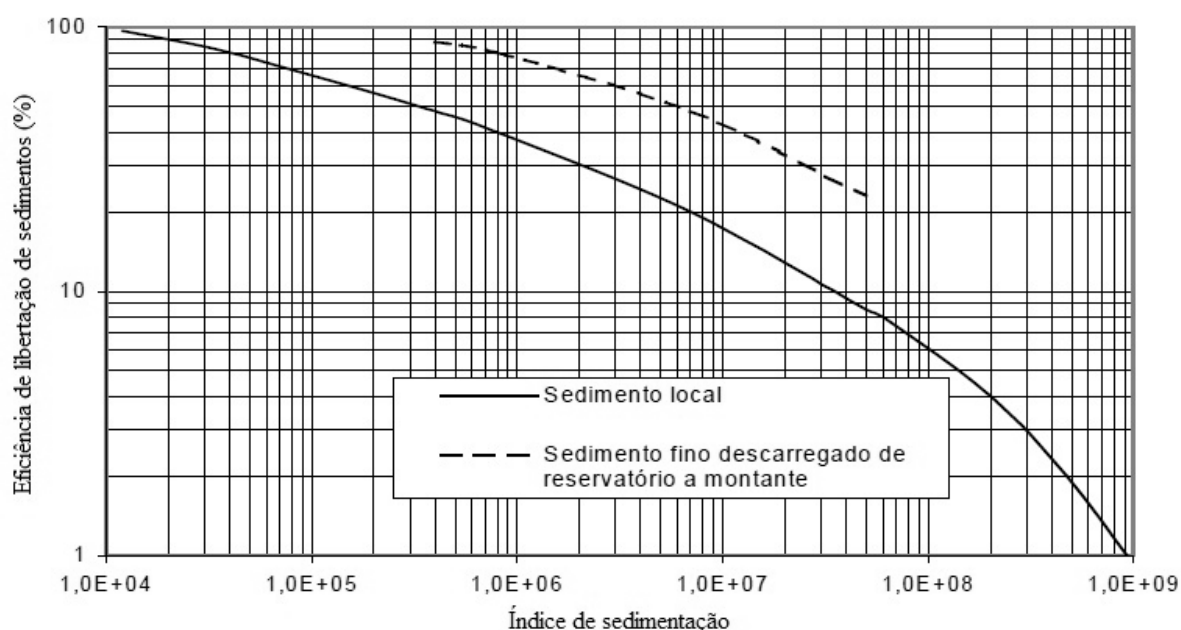


Figura 8. Curvas de eficiência de retenção de sedimentos, segundo Churchill (Carvalho *et al.*, 2000).

A curva de Churchill (Figura 8), apresentada por Morris e Fan (1997) e Vanoni (2006), possui no eixo das abcissas o índice de sedimentação do reservatório (IS), equivalente ao rácio entre o período médio de retenção de sedimentos e a velocidade média de escoamento através do reservatório. De modo a aplicar este método, são necessários no mínimo os valores do volume de armazenamento, da taxa de escoamento anual e do comprimento do reservatório. O índice de sedimentação, calculado com base na capacidade e comprimento do reservatório, escoamento afluente, período de retenção e velocidade de escoamento, é então introduzido na curva de Churchill de modo a obter a eficiência de libertação de sedimentos.

3.4. Correntes de turbidez

Vários autores, entre eles, Cesare *et al.* (2001) e Durgunoglu e Singh (1993), definem correntes de turbidez como sendo escoamentos conduzidos por excessivas diferenças de densidade, provocadas pela presença de água carregada de partículas finas em suspensão, na água da albufeira relativamente limpa de sedimentos. A elevada concentração de partículas tornam a água turva mais densa que a água limpa do reservatório, o que por conseguinte, implica que as correntes em questão mergulhem por baixo da água limpa e circulem no fundo do reservatório, a jusante deste ponto de mergulho.

Sloff (1991) e Durgunoglu e Singh (1993) defendem que, durante a passagem pelo reservatório, as correntes de turbidez são passíveis de depositar ou recolocar em suspensão as partículas granulares já depositadas, alterando por completo a quantidade de sedimentos em suspensão presentes no escoamento. Mesmo correntes de baixa velocidade, possuem capacidade para transportar grandes quantidades de sedimentos para o interior do reservatório. Embora uma corrente de turbidez, no caso de reservatórios com uma declividade elevada, possa erodir o leito, recolher sedimentos, tornar-se mais densa e acelerar, na maioria das situações a corrente é de deposição. Numa corrente de deposição, a frente da mesma é responsável pela erosão, enquanto a zona a montante é responsável por depositar sedimentos.

Yang (2006) e Lameiro e Taveira-Pinto (2009) estabelecem as principais condições para a ocorrência deste fenómeno. São elas: inclinações elevadas do leito do rio e caudais afluentes com grandes concentrações de sedimentos, reservatório do tipo garganta ou vale encaixado, hidráulica da albufeira adequada, isto é, com elevadas profundidades e reduzidas velocidades de escoamento. Contudo, segundo Durgunoglu e Singh (1993), estas condições não são suficientes para garantir uma eficiente passagem das correntes. Yang (2006), Sloff (1991) e Wang e Hu (2009) acrescentam ainda que para a continuidade de movimento das correntes de turbidez é necessário existir um fornecimento constante de sedimentos e intensidade suficiente das correntes para superar alguma resistência ao escoamento. No geral, quando uma corrente de turbidez atinge uma barragem, a tendência será para esta subir, ser reflectida e formar redemoinhos.

3.5. Impactos associados ao assoreamento

Devido ao facto dos rios transportarem muito mais água do que sedimentos, demora consideravelmente mais tempo a preencher um reservatório com sedimentos do que com água. Isto, aliado ao facto de que os depósitos de sedimentos se encontram submersos, conduz

a uma consecutiva negligência dos impactos associados à sedimentação, do ponto de vista político, popular e da engenharia (Morris e Fan, 1997).

O aprisionamento de sedimentos a montante de uma barragem resulta numa redução efectiva do equilíbrio sedimentológico no curso do rio. Tal desequilíbrio traduz-se em impactos e consequências a nível social, económico e ambiental, que por sua vez se fazem sentir a montante e a jusante do empreendimento, com mais ou menos intensidade.

3.5.1. Montante

Existe uma vasta gama de impactos relacionados com a sedimentação a montante das barragens, dos quais apenas os mais prementes serão referenciados no presente trabalho.

Aquele que apresenta maior ênfase nos testemunhos de diversos autores é a perda de capacidade de armazenamento do reservatório que, a nível mundial, se estima rondar os 1% a 1.5% por ano. A sucessiva deposição de sedimentos no interior do reservatório, em especial os sedimentos pertencentes ao delta, reduz a eficiência de retenção do reservatório, bem como a sua capacidade para abastecimento de água, produção eléctrica e controlo de cheias por redução substancial do volume de água armazenado (Morris e Fan, 1997; Wang e Hu, 2009). Com efeito, toda a vida útil do empreendimento se encontra ameaçada pelos processos de assoreamento nos respectivos reservatórios.

Destacam-se ainda os impactos gerados pelos depósitos do delta, responsáveis pelo aumento da agradação para montante e pela subida dos níveis de água. Estes potenciam o aumento da frequência e do nível de água das inundações, prejudicam a navegabilidade e alteram condições ecológicas, nomeadamente devido ao aumento dos níveis freáticos, segundo afirmam Sloff (1991); Morris e Fan (1997).

Segundo os autores anteriores, os sedimentos que atingem a barragem podem gerar problemas a nível dos componentes e estrutura, uma vez que poderão obstruir tomadas de água e descarregadores de fundo, podendo mesmo por vezes obstruir ou danificar comportas não destinadas à passagem de carga sólida. A maquinaria hidráulica, como é o caso das turbinas, poderá sofrer com o processo abrasivo, substancialmente acelerado pela entrada de sedimentos no sistema, consequências a nível de eficiência e custos de manutenção.

3.5.2. Jusante

A construção de barragens é considerada por Wang e Hu (2009) como o factor preponderante na redução do fornecimento de sedimentos às zonas de jusante, com um número diverso de impactos que importam referir.

Os materiais de origem continental impedidos de seguirem o seu caminho natural até aos oceanos resultam na alteração da estrutura da linha costeira e respectivas praias. Com efeito, esta surge como uma das problemáticas de maior premência a jusante das barragens, com graves repercussões a nível ambiental (Fonseca, 2002; Lameiro e Taveira-Pinto, 2009; Ribeiro e Coelho, 2009).

Praticamente desprovida de carga sólida e com uma concentração de sedimentos muito inferior à sua capacidade de transporte, a água que transpõe a barragem tende a erodir progressivamente o leito do rio, de modo a criar um novo equilíbrio, provocando um decréscimo na declividade do mesmo e um revestimento com sedimentos de carácter mais grosseiro (Sloff, 1991; Morris e Fan, 1997; McCartney, 2009). Esta degradação do leito é passível de evoluir para montante afectando a estrutura da barragem. É ainda de salientar que existe uma erosão excessiva dos bancos marginais, aumentando a respectiva altura e diminuindo as planícies aluviais, bem como uma potencial erosão das fundações de pontes a jusante, redução da navegabilidade em zonas críticas, rebaixamento nos níveis das tomadas de água e redução das superfícies freáticas nas zonas ribeirinhas. Contudo, Dewals *et al.* (2010) afirmam que durante a primeira década de operação do reservatório, a erosão é limitada pela armação formada pelos materiais grosseiros, uma vez que estes aprisionam os sedimentos mais finos.

Os impactos relativos aos ecossistemas devem igualmente ser considerados, uma vez que a armação do leito a jusante torna-o inadequado para as espécies nativas e/ou introduzidas, no que respeita ao habitat ou à reprodução. Certas substâncias orgânicas associam-se às argilas, como tal, o aprisionamento desta componente sólida induz uma redução da quantidade de fontes alimentares para determinadas espécies (Morris e Fan, 1997).

Segundo Carvalho *et al.* (2000), os efeitos mencionados são de menor intensidade em pequenos aproveitamentos, no entanto, em grandes reservatórios tornam-se bastante evidentes, podendo mesmo fazer-se sentir centenas de quilómetros a jusante do empreendimento.

Contudo, surgem algumas vantagens do aprisionamento dos sedimentos a montante das barragens. Entre eles, a diminuição da concentração de sólidos em suspensão a jusante, torna

a água mais translúcida, favorecendo locais usados para a recreação. A navegação é igualmente facilitada devido à formação de um canal estável, mais largo e profundo, sem necessidade de recorrência a dragagens, em conformidade com Sloff (1991) e Morris e Fan (1997).

3.6. Situação mundial

A quantidade total de armazenamento dos reservatórios do mundo ascende aos 6 815 km³, com 70% deste valor situado na China, E.U.A. e Europa do Norte. No entanto como já foi referido anteriormente, anualmente é perdida em média cerca de 1% a 1.5% dessa capacidade de armazenamento, devido aos fenómenos de sedimentação. Esta taxa de sedimentação varia com a região geográfica, sendo a China o país que lidera com 2.3% de perda de capacidade anual por sedimentação. Existe ainda uma grande variação das taxas médias regionais para as taxas médias de reservatórios individuais, mostrando uma grande variabilidade espacial deste parâmetro. A título de exemplo, na Turquia a taxa média de perda de capacidade ronda os 1.2%. Contudo, quando verificado o comportamento individual das albufeiras, observam-se valores entre os 0.2% e os 2.4%, o que indica que o problema é sobretudo localizado em determinados reservatórios (Dewals *et al.*, 2010).

Tabela 1. Taxa de sedimentação de reservatórios, a nível mundial (Dewals *et al.*, 2010).

Região	Quantidade de grandes barragens	Capacidade de armazenamento (km ³)	Percentagem anual de perda de capacidade
China	22 000	510	2.3
América do Norte	7 205	1 845	0.2
Europa	5 497	1 083	0.17-0.2
África	1246	763	0.08-1.5
Mundo	45 571	6 325	0.5-1.0

Na Tabela 1, é apresentado o número de barragens para as regiões geográficas de maior importância, juntamente com a capacidade de armazenamento e a taxa anual de perda de capacidade.

Segundo White (2001), por forma a avaliar a variação da taxa de perda de capacidade de armazenamento a nível mundial, foram recolhidos e analisados dados de aproximadamente 2300 barragens, em 31 países. Estes foram agrupados por regiões geográficas, tendo em conta o mapa global de fornecimento de sedimentos (0). Sumarizando, a análise expõe que, por

volta do ano 2000, aproximadamente 567 km³ (10% do total de volume de armazenamento existente no mundo) tinham sido perdidos devido à sedimentação.

Tabela 2. Taxas de sedimentação regionais (White, 2001)

Região	Percentagem anual de perda de capacidade	Meia-vida útil do reservatório (anos)
América do Norte	0.20	250
América do Sul	0.10	500
Europa do Norte	0.20	250
Europa do Sul	0.17	294
África a Sul do Sahara	0.23	217
África do Norte	0.08	625
China	2.30	22
Ásia do Sul	0.52	96
Ásia Central	1.00	50
Sudeste da Ásia	0.30	167
Orla do Pacífico	0.27	185
Médio Oriente	1.50	33

4. CONTROLO E MITIGAÇÃO DO ASSOREAMENTO EM RESERVATÓRIOS

Segundo Durgunoglu e Singh (1993), o planeamento, construção e operação de uma barragem deve minimizar perturbações sociais e económicas, ser benéfico para o ambiente, ter uma boa relação custo-benefício e ter em conta considerações de equidade intergeracional.

Segundo Bergkamp, citado por McCartney (2009), as questões ambientais desempenhavam um papel pouco influente no planeamento e modo de operação das barragens, o que leva a concluir que a maior preocupação na fase de projecto deste género de obras se relacionava essencialmente com o aumento da vida útil do reservatório através da preservação da sua capacidade de armazenamento. No entanto, nas últimas três décadas, assistiu-se a um aumento da sensibilização ambiental, o que por sua vez levou ao reconhecimento de que a gestão dos recursos hidráulicos deverá incluir a responsabilidade de minimizar os impactos ambientais e sociais referidos no capítulo anterior. Com efeito, foram desenvolvidos esforços para o desenvolvimento de soluções com vista a atenuar esses mesmos impactos. Tais esforços resultaram em medidas de gestão de sedimentos de sucesso variável e duvidoso.

Uma gestão eficaz de sedimentos deve, de acordo com Yang (2006), ter vários factores em consideração, tais como a legislação, restrições territoriais, actividades humanas, aspectos económicos, a segurança, o tipo, dimensão e cota dos descarregadores da barragem e por último, as características dos escoamentos líquidos e sólidos afluentes.

Existem duas aproximações básicas ao controlo e gestão da sedimentação em albufeiras, mais precisamente, técnicas de redução de sedimentos afluentes ao reservatório e técnicas de controlo e mitigação da sedimentação nos limites do reservatório. Embora a generalidade das estratégias de gestão de sedimentos, pertencentes às duas categorias mencionadas, para grandes albufeiras, e pequenas e médias albufeiras sejam as mesmas, na prática tendem a ser diferentes, proporcionalmente à magnitude dos reservatórios. Assim, admite-se que as estratégias de gestão de sedimentos aplicadas em albufeiras grandes podem ser empregadas nas albufeiras pequenas e médias, mas o contrário já não se verifica.

4.1. Técnicas de redução de sedimentos afluentes

Quatro tipos de medidas são parte integrante das estratégias de redução de sedimentos afluentes: a gestão da bacia hidrográfica, retenção de sedimentos a montante, derivação de sedimentos e armazenamento fora do curso de água.

As técnicas de gestão de bacias e as de retenção de sedimentos a montante, são essencialmente implantadas com o objectivo de diminuir a afluência de sedimentos à albufeira, não tendo qualquer tipo de amortecimento nos impactos resultantes a jusante da barragem. No entanto, Durgunoglu e Singh (1993) defendem que uma quantidade significativa de sedimentos prossegue o seu caminho natural para o interior do reservatório, seja por ineficácia destas técnicas na retenção das partículas ou por uso incorrecto das mesmas.

4.1.1. Gestão da bacia hidrográfica

A erosão de solos é um problema de considerável dimensão em muitas áreas do mundo, com taxas acima das 1 000 toneladas/km²/ano. Gera consequências de salientar, como é o caso da redução na fertilidade das terras, chegando mesmo em casos extremos a tornar grandes áreas totalmente inférteis. Este fenómeno, embora de origem natural, é fortemente acelerado por actividades desenvolvidas pelo homem, o que leva vários autores a defenderem que o factor de maior contribuição para o assoreamento em albufeiras é o uso impróprio e a fraca gestão dos terrenos da bacia (Durgunoglu e Singh, 1993; Palmieri *et al.*, 2003). Com efeito, grandes esforços têm sido desenvolvidos ao longo dos anos a, nível mundial, com o intuito de controlar e reduzir as taxas de erosão de solos, por meio de técnicas de gestão das bacias hidrográficas.

Entre outros, Morris e Fan (1997) e Yang (2006), referem a existência de várias técnicas para gestão da bacia hidrográfica com vista à minimização dos sedimentos afluentes à albufeira. Entre elas, destacam-se:

- Protecção de solos nus, ou seja, cobertura vegetal dos mesmos com vista à protecção contra a erosão provocada pela precipitação. São exemplos a reflorestação e a rotação de culturas.

- Gestão de inclinações dos solos de forma a controlar a concentração dos escoamentos, visto que estes são mais evidentes em solos inclinados. O terraceamento e o cultivo em faixas são dois exemplos concretos.

Morris e Fan (1997) classificam as diversas técnicas existentes em três categorias gerais:

- Medidas estruturais ou mecânicas. Baseiam-se no controlo do movimento da água à superfície, de maneira a reduzir a sua velocidade de escoamento, aumentar a capacidade de armazenamento e eliminar de forma segura o escoamento sobre os terrenos. Caracterizam-se pelos elevados custos de construção associados e pela necessidade de manutenção das estruturas.
- Medidas vegetativas ou agronómicas. Estas medidas contam com as propriedades naturais de regeneração da vegetação, na gestão das plantações ou resíduos de plantações para proteger o solo. Embora sejam medidas de custos inferiores, a vegetação por si só poderá ser incapaz de controlar a erosão por escoamentos concentrados.
- Medidas operacionais. Técnicas de gestão e programação com o objectivo de minimizar o potencial de erosão. Estas são de carácter meramente preventivo, procurando evitar a erosão e servir de apoio às medidas anteriormente descritas.

Segundo argumenta Yang (2006), a eficácia das medidas mencionadas varia com a magnitude das bacias. Uma bacia hidrográfica grande terá uma menor eficácia a curto prazo, enquanto uma bacia de menor dimensão surtirá resultados num período mais restrito. Este facto é fundamentado por Palmieri *et al.* (2003), que defende a existência de um elevado desfasamento entre a implementação das medidas e a percepção dos seus efeitos na redução dos sedimentos afluentes aos rios. O desfasamento deve-se essencialmente à baixa taxa de afluência de sedimentos provenientes de bacias de grandes dimensões, e aos sedimentos estarem distribuídos heterogeneamente ao longo desta. Consequentemente, os materiais erodidos não afluem de imediato aos rios, apresentando maiores taxas após sucessivas tempestades. Em algumas bacias, onde os rácios de afluência de sedimentos se aproximam da unidade, isto é, onde o material erodido possui dimensões reduzidas e é rapidamente transportado para os cursos de água, a gestão das bacias poderá apresentar-se eficaz a curto prazo.

Não obstante, a implementação destas medidas requer a cooperação de um elevado número de proprietários e agricultores, tornando esta alternativa difícil de implementar na

maioria dos casos. Por norma, a redução da sedimentação em reservatórios beneficia outros, que não os proprietários ou exploradores das terras (Durgunoglu e Singh, 1993; Dewals *et al.*, 2010).

De acordo com Morris e Fan (1997), mesmo os casos de aplicação bem sucedida destas técnicas, não implicam necessariamente uma completa solução para a afluência de sedimentos aos rios, devido a determinadas limitações. Algumas bacias e respectivos cursos de água possuem, naturalmente, elevadas taxas de produção de sedimentos. São medidas que exigem um compromisso a longo prazo, com resultados igualmente a longo prazo.

4.1.2. Retenção de sedimentos a montante

O conjunto de estratégias descritas na presente secção caracteriza-se essencialmente pela necessidade de construção de estruturas que permitem reter com eficiência, diversas gamas da carga sólida presente no escoamento. De uma forma geral, estas estruturas hidráulicas poderão ser classificadas em três categorias (barreiras de controlo, bacias de detritos e bacias de deposição de sedimentos).

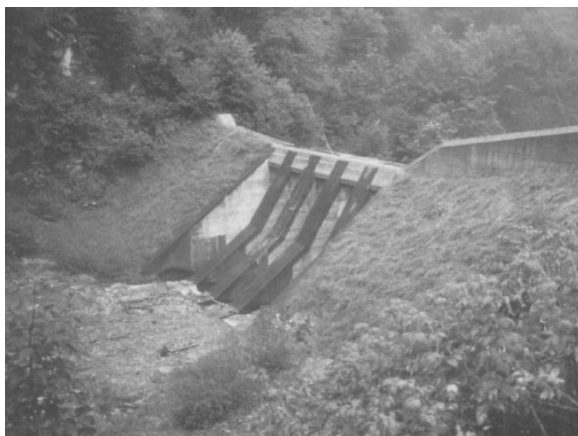
Morris e Fan (1997) fazem alusão ao facto de que, em muitos reservatórios, o controlo da sedimentação é executado pela retenção de sedimentos nas barragens a montante. No entanto, existem duas desvantagens associadas, já que a capacidade das barragens para armazenar sedimentos é limitada e os proprietários desses empreendimentos poderão alterar a operação destas de forma a transpor sedimentos para jusante.

4.1.2.1. Barreiras de controlo

Além de barreiras de controlo, este tipo de construções poder-se-ão chamar de barragens de detritos ou, num vocabulário mais comum, represas.

Segundo Durgunoglu e Singh (1993) e Palmieri *et al.* (2003), estas estruturas são usadas em cursos de água montanhosos, onde os materiais de maiores dimensões são abundantes no escoamento. São construídas perpendicularmente aos cursos de água, normalmente nos afluentes que mais contribuem para o fornecimento de sedimentos. Têm por objectivo controlar e aprisionar o fluxo de sedimentos grosseiros, que por sua vez iriam afluir ao reservatório principal, depositando-se no delta. Os depósitos acumulados podem e devem ser removidos periodicamente, durante as épocas de escoamentos mais baixos em que estes ficam expostos. Na falta de operações de limpeza destas estruturas, a vida útil será demasiado curta,

perdendo por completo a capacidade de cumprir os objectivos para os quais são construídas. Na Figura 9 encontram-se ilustradas duas barreiras de controlo distintas.



a) Styria, Áustria



b) Salzburg, Áustria

Figura 9. Exemplos de barreiras de controlo (Armanini *et al.*, 1991).

Palmieri *et al.* (2003) defendem que, no que toca ao planeamento e construção destas estruturas, é necessário ter em especial atenção os escoamentos proporcionados por grandes enchentes, a realização dos projectos de aterro e as estruturas de dissipação de energia a jusante. Esta última, quando desconsiderada, é responsável por possíveis erosões na base da estrutura, possibilitando o respectivo colapso e a libertação dos sedimentos aprisionados.

Para Morris e Fan (1997), este género de estruturas tem como objectivo primordial o controlo da erosão do leito, uma vez que reduzem o declive do leito, e consequentemente a velocidade de escoamento, proporcionando a deposição dos sedimentos grosseiros transportados no leito do rio. Quando utilizadas para nivelamento do leito do rio, as barreiras de controlo são mais eficazes agrupadas (Figura 10), sendo o espaçamento entre cada barreira dependente da altura das mesmas e da inclinação do canal. Barreiras mais afastadas são mais eficientes na retenção de sedimentos, porque são mais altas e apresentam uma maior capacidade de armazenamento.

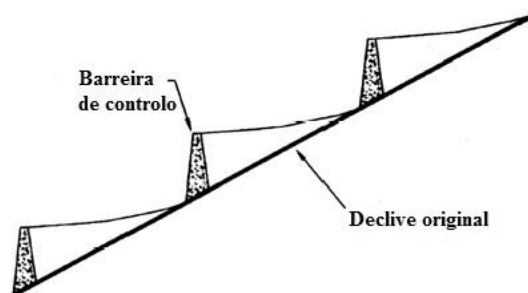


Figura 10. Esquema com agrupamento de barreiras de controlo (Morris e Fan, 1997).

4.1.2.2. Bacias de detritos

As bacias de detritos são susceptíveis de serem construídas como barragens convencionais, com vertedouros ou com comportas permanentemente abertas, como bacias equipadas com um sistema denominado *perforated riser* (Figura 11), ou como poços escavados no leito. Para o caso das estruturas serem dimensionadas para escoamentos de detritos, são necessárias técnicas de protecção das áreas imediatamente a jusante, como é o caso de canais com paredes de protecção (Morris e Fan, 1997).



Figura 11. Exemplo de bacia de detritos em La Cañada, no condado de Los Angeles, California (Pritchard, 2010).

Os mesmos autores asseguram que estas estruturas são implantadas no curso de água com o objectivo de aprisionar apenas os sedimentos de maiores diâmetros, que em condições naturais seriam transportados para jusante como carga de lavagem, ou as cargas sedimentares hiperconcentradas associadas aos escoamentos de detritos, originados em áreas montanhosas. Por vezes as estruturas em causa são dimensionadas por forma a aprisionar a carga sedimentar presente num único fenómeno de escoamento de detritos. A eficiência de retenção de apenas uma parcela da carga total do escoamento é conseguida devido à pequena envergadura hidrológica da bacia e baixa capacidade de armazenamento. Consequentemente, as bacias de detritos são bastante limitadas em termos de armazenamento, necessitando de remoção periódica dos sedimentos acumulados, caso se pretenda que a estrutura faculte protecção a longo prazo.

A limpeza dos sedimentos acumulados nas bacias de detritos pode ser efectuada por meios mecânicos ou através de remoção hidráulica. A remoção mecânica é efectuada com equipamento convencional de movimentação de terras, após o esvaziamento da bacia e a secagem dos sedimentos, tal como se encontra representado na Figura 11. A remoção hidráulica é atingida pelo uso de lavagem com esvaziamento, durante cheias de menor dimensão (ver secção 4.2.2.1.2).

4.1.2.3. Bacias de deposição de sedimentos

Fundamentalmente usadas em áreas urbanas ou locais de construção, estas bacias são projectadas com o objectivo de reter os sedimentos em suspensão presentes no escoamento de um rio, bem como os poluentes a estes associados, proporcionando um controlo da qualidade da água, e protecção das estruturas e dos ambientes aquáticos a jusante. São igualmente passíveis de proporcionar outros benefícios, como a redução da descarga do pico de cheia e a criação de habitats aquáticos no seu interior (Morris e Fan, 1997).

Estas construções devem reter os escoamentos de pequenos eventos de cheia durante um período prolongado de tempo e ao mesmo tempo fornecer uma detenção adequada para os eventos de maiores dimensões. A Figura 12 demonstra esquematicamente como funciona a compartimentação de uma bacia de deposição, por forma a poder cumprir as exigências pretendidas.

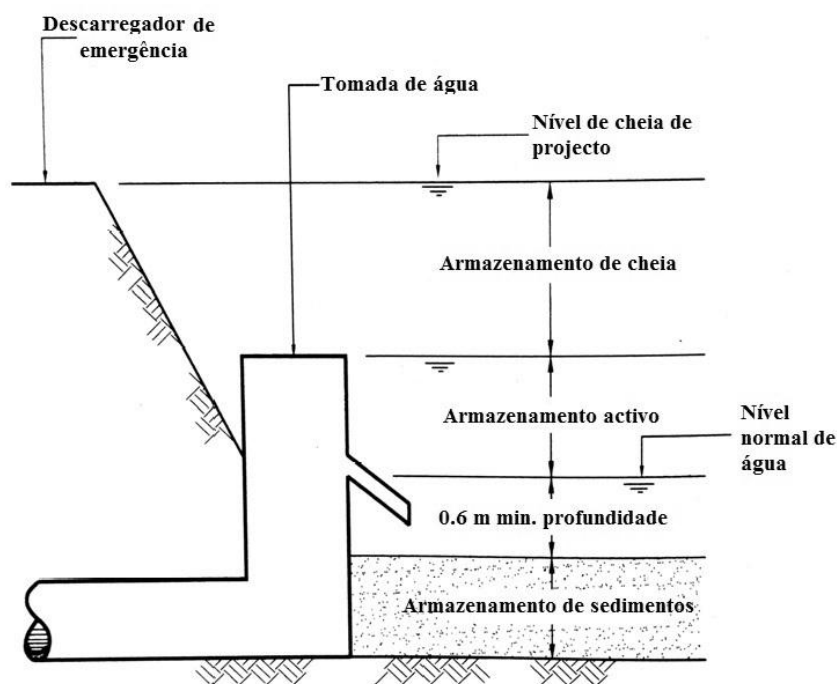


Figura 12. Esquema do corte transversal de uma bacia de deposição de sedimentos (Morris e Fan, 1997).

Devido à retenção de sedimentos, a bacia irá eventualmente ficar preenchida. Logo, a remoção periódica de sedimentos é tão importante como o planeamento, para manter a eficiência de retenção da bacia. O volume e a profundidade da bacia são calculados com base na previsão da carga sedimentar dos escoamentos de cheia e na frequência de limpeza da bacia. Em locais de construção com níveis de afluência de sedimentos superiores, a bacia poderá ter de ser limpa várias vezes ao ano, ou após cada tempestade.

4.1.3. Derivação de sedimentos

As técnicas de derivação de sedimentos (*bypass*) são usadas para a minimização da entrada de sedimentos no reservatório. Para tal recorre-se à execução de uma estrutura de desvio de enchentes carregadas de sedimentos, com restituição do escoamento a jusante (Yang, 2006; Lameiro e Taveira-Pinto, 2009). Este método constitui uma solução, não só para os problemas de assoreamento a montante da barragem, como para os impactos que se fazem sentir a jusante das barragens.

Lameiro e Taveira-Pinto (2009) referem que, geralmente este método acopla à construção de barragens de detritos, uma estrutura de derivação, que poderá ser em canal aberto ou em túnel, e estruturas de restituição de sedimentos a jusante, como se pode verificar na Figura 13 e Figura 14. A barragem de detritos promove o ambiente ideal de deposição de sedimentos, que posteriormente serão lavados e conduzidos pelo canal de derivação.



Figura 13. Sistema de passagem de sedimentos com galeria de desvio na albufeira Amsteg, no Rio Reuss, na Suíça (Batuca e Jordaan, 2000).

Morris e Fan (1997) e Palmieri *et al.* (2003) referem que esta técnica pode ser empregada em barragens instaladas em meandros, como se pode confirmar na Figura 14 correspondente, ao reservatório de Nagle, na África do Sul. Nestes casos, é instalada uma barreira de controlo juntamente com uma série de descarregadores de cheia a montante do meandro e do reservatório. Os referidos descarregadores estão habitualmente fechados,

permitindo que o escoamento ultrapasse a barreira de controlo e invada o reservatório. Aquando da ocorrência de cheias, os descarregadores são abertos e a barreira de controlo encaminha o escoamento carregado de sedimentos para o canal de derivação, lavando simultaneamente os depósitos previamente depositados a montante da mesma. Esta técnica é passível de derivar sedimentos transportados tanto em suspensão como por arrastamento.

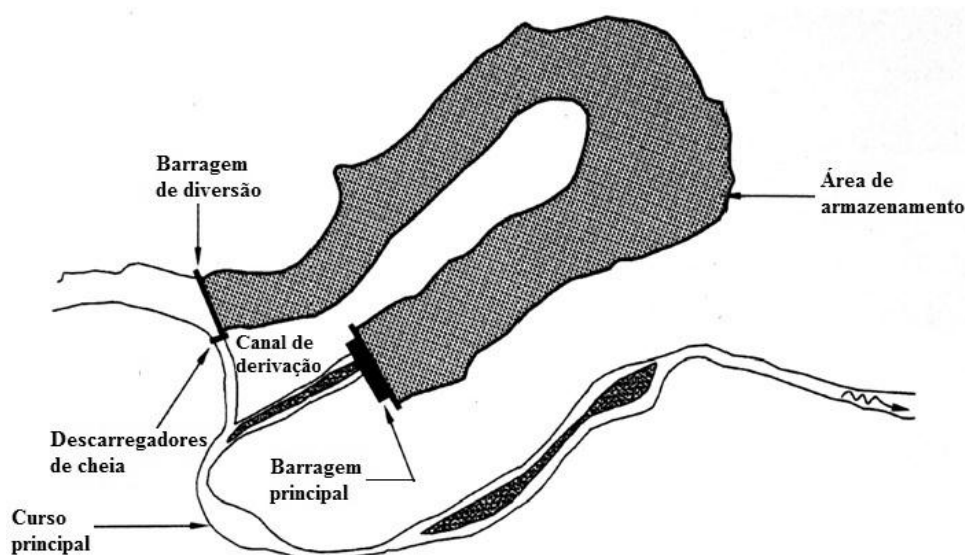


Figura 14. Sistema de derivação de sedimentos na albufeira de Nagle, África do Sul. (Morris e Fan, 1997)

Quando devidamente projectadas, as estruturas em questão são muito eficientes, podendo no entanto apresentar problemas durante a operação, aumentando os custos de manutenção destes sistemas. Os canais estão sujeitos a elevados níveis de erosão provocada pelos sedimentos presentes nos escoamentos, existe uma forte possibilidade de acumulação de detritos ao longo do canal e a topografia nem sempre possibilita a sua execução. Assim, na maioria dos casos, a construção deste tipo de estruturas apresenta custos demasiado altos. (Palmieri *et al.*, 2003; Yang, 2006; Lameiro e Taveira-Pinto, 2009).

4.1.4. Armazenamento fora do curso de água

De acordo com Morris e Fan (1997) e Palmieri *et al.* (2003), reservatórios com armazenamento fora do curso de água são todas as estruturas de armazenamento construídas fora do leito principal do rio, preenchidas com água de baixa concentração de sedimentos proveniente do próprio rio. A execução destes reservatórios pode ser obtida através do barramento de um afluente com baixo nível de concentração de sedimentos, ou simplesmente fazendo uso das planícies de inundação paralelas ao canal principal (Figura 15).

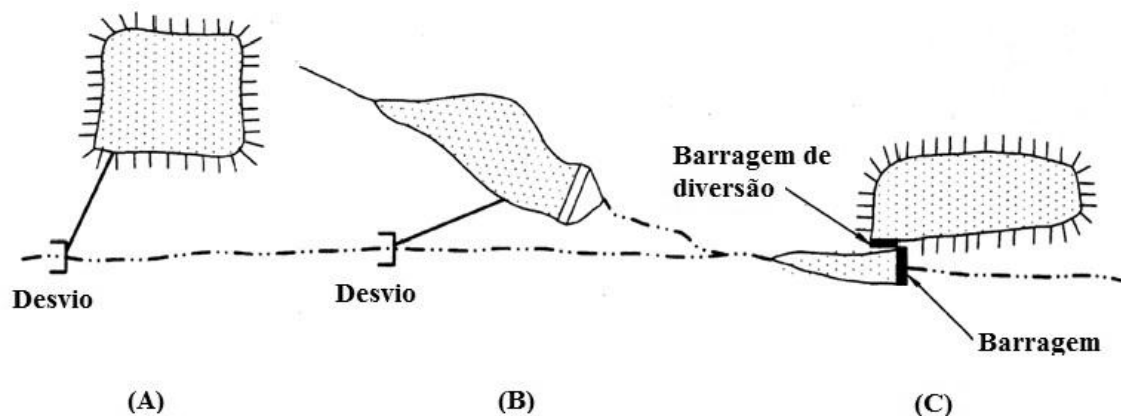


Figura 15. Esquema das metodologias de armazenamento fora do curso de água: A – Planície de inundação; B – Afluente; C – Planície de inundação (Morris e Fan, 1997).

Várias metodologias podem ser utilizadas com vista a obter baixas concentrações de sedimentos nestes reservatórios:

- Recorrendo ao uso de estruturas de tomada de água com vazões limitadas ou operações controladas das comportas das tomadas de água, as descargas de cheia com grandes quantidades de sedimentos poderão ser parcialmente ou totalmente desviadas do reservatório;
- A estrutura da tomada de água pode ser dimensionada de forma a evitar a entrada de sedimentos de maiores proporções;
- A barragem de diversão poderá ser operada de modo a reter sedimentos presentes na água desviada, necessitando de se proceder à lavagem destes após o armazenamento da água.

Embora esta técnica não se apresente como uma opção concreta para a gestão de sedimentos em reservatórios, deverá ser considerada em novos projectos, dado que possui várias vantagens associadas (Palmieri *et al.*, 2003). Como o escoamento é controlado no ponto de diversão, um reservatório deste género não requer uma estrutura de armazenamento demasiado elaborada e dispendiosa (Morris e Fan, 1997). Dado que armazena apenas água relativamente limpa de sedimentos, não necessita de espaço reservado à acumulação de sedimentos, apresenta custos de manutenção reduzidos quando comparados com reservatórios ordinários e possibilita a obtenção de águas de maior qualidade, com benefícios quer para o homem, quer para os organismos e biodiversidade. Apesar das vantagens enunciadas, este tipo de reservatórios tem um grande inconveniente que é a inerente incapacidade de armazenar a totalidade da água presente no escoamento.

4.2. Técnicas de controlo e mitigação de sedimentação no reservatório

O controlo e a mitigação da deposição de sedimentos no interior do reservatório podem ser atingidos de forma efectiva e expedita, através da implementação de estratégias limitadas essencialmente à barragem e ao reservatório.

Estas estratégias podem ser amplamente classificadas em dois grandes grupos. No primeiro, o objectivo primordial das operações é a minimização da deposição de sedimentos no reservatório. Para tal, usam-se as passagens de correntes de turbidez (*venting*) e as técnicas de passagem de sedimentos (*sluicing*), em épocas de cheias. No segundo grupo, o objectivo principal passa pela remoção de sedimentos já depositados no reservatório. Como tal, recorre-se a estratégias de lavagem com rebaixamento (*drawdown flushing*), lavagem com esvaziamento (*flushing and emptying*), sifonagem (*siphoning*), dragagem e extracção a seco (Durgunoglu e Singh, 1993).

4.2.1. Redução da deposição de sedimentos

Importa referir que as técnicas pertencentes a este grupo encontram-se subdivididas nas seguintes categorias de operação do reservatório: rebaixamento sazonal, rebaixamento com previsão de hidrograma, rebaixamento por curva padrão e passagem de correntes de turbidez. De acordo com vários autores, as quatro metodologias podem ser reunidas num só grupo de técnicas, denominado de *sluicing*, ao passo que Morris e Fan (1997) agrupam estas quatro técnicas, denominando-as de *pass-through*.

A carga sedimentar num escoamento é extremamente variável ao longo do tempo. Com efeito, a maioria dos sedimentos afluentes a um reservatório estão contidos numa pequena fracção da água afluente. Estima-se que 80% da carga sólida anual se encontra presente nos escoamentos de cheia e cerca de 80% dessa carga sólida poderá ser descarregada para jusante com o auxílio das técnicas referidas. O objectivo das medidas é identificar a porção do escoamento com sedimentos afluentes e geri-la de forma diferente do escoamento de água limpa, prevenindo ou minimizando a deposição de sedimentos (Morris e Fan, 1997). No entanto, e segundo Shen e Janssen (1999) e Lameiro e Taveira-Pinto (2009), as concentrações de sedimentos variam muito durante uma mesma cheia. Como é comprovado pela Figura 16, por norma, o pico de sedimentos chega antecipadamente ao pico da cheia, facto que é favorável tanto para a passagem de sedimentos, como para o controlo de cheias.

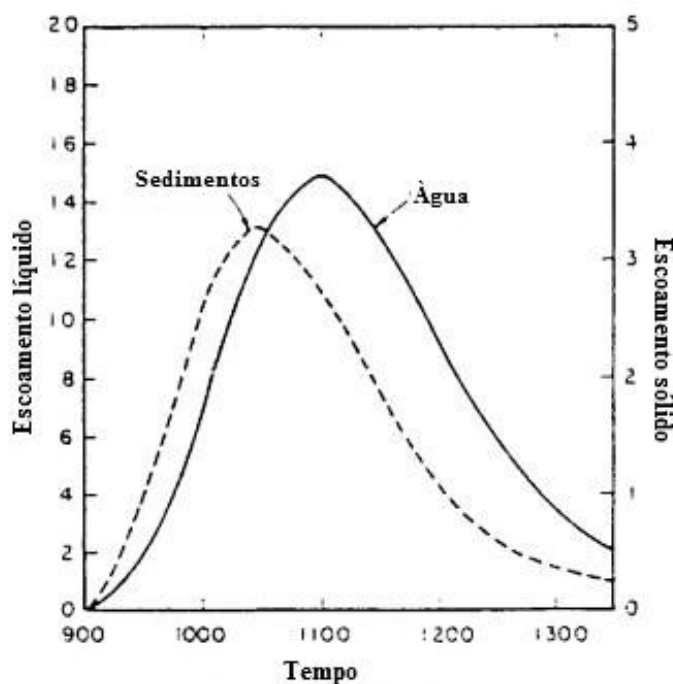


Figura 16. Hidrograma típico do escoamento líquido e sólido durante uma cheia (Shen e Janssen, 1999).

De acordo com Durgunoglu e Singh (1993) e Lameiro e Taveira-Pinto (2009), as técnicas pertencentes ao presente grupo facilitam a passagem de sedimentos para jusante da barragem, o mais rapidamente possível, antes destes se depositarem e consolidarem, o que reduziria a eficiência de retenção do reservatório. A identificação dos escoamentos em épocas de cheia torna-se então vital nestas operações, dado que, fazendo uso da capacidade transportadora desses escoamentos, é possível maximizar a evacuação dos sedimentos para jusante. Mesmo não sendo o objectivo primordial, Yang (2006) e Dewals *et al.* (2010) referem que também ocorre transporte de sedimentos previamente depositados nas regiões interiores do reservatório.

De uma forma geral, segundo Morris e Fan (1997), as técnicas de redução da retenção de sedimentos são consideradas as mais benéficas do ponto de vista ambiental, uma vez que preservam parcialmente o curso natural dos sedimentos ao longo do rio. Em alguns casos, ambas as parcelas do escoamento sólido são transportadas para jusante da barragem, suavizando os impactos no leito do rio. Lameiro e Taveira-Pinto (2009) consideram o conjunto de técnicas em causa como uma das formas mais eficientes e, em determinados casos específicos, mais económica, de preservar a capacidade de armazenamento da albufeira.

Estas técnicas obrigam à existência de descarregadores de fundo na barragem, para a evacuação de sedimentos. Outra desvantagem mencionada por Morris e Fan (1997) é a libertação considerável de água associada, tornando esta técnica mais sustentável em

reservatórios hidrologicamente pequenos, onde as descargas de cheia superam a respectiva capacidade de armazenamento.

4.2.1.1. Rebaixamento sazonal

Segundo Morris e Fan (1997) e Garcia (2007), um reservatório operado segundo a técnica de rebaixamento sazonal poderá ser parcialmente ou completamente esvaziado durante a época de cheias. Vários autores, entre os quais Palmieri *et al.* (2003) e Yang (2006) defendem que o objectivo desta operação é aumentar a velocidade de escoamento, que por sua vez aumenta a capacidade de transporte de carga sólida ao longo do reservatório. Este processo diminui o tempo de aprisionamento dos sedimentos a montante da barragem, prevenindo que estes se depositem. Próximo do fim da época de cheias, o nível de água no reservatório é novamente subido de modo a armazenar a água limpa de sedimentos.

Quando o reservatório é esvaziado por completo durante a época de cheias, o efeito é semelhante ao da lavagem com esvaziamento, explicado mais à frente no presente trabalho. A única característica que os distingue é o facto de os descarregadores, no primeiro caso, permanecerem abertos durante toda a época de cheias, de modo a que os sedimentos sejam encaminhados através do reservatório, em vez de serem lavados os sedimentos já depositados (Morris e Fan, 1997).

Garcia (2007) afirma que, em áreas de elevada sazonalidade de precipitação, as primeiras chuvas induzem escoamentos consideravelmente mais ricos em sedimentos, do que as chuvas da parte final da época, uma vez que por essa altura a vegetação terá crescido, protegendo o solo da erosão.

4.2.1.2. Rebaixamento com previsão de hidrograma

Em reservatórios de volume de armazenamento significativo ou limitados na sua capacidade de descarga, localizados em rios sem períodos prolongados ou previsíveis de escoamentos de cheia, a melhor opção passa pela aplicação da técnica de rebaixamento com previsão de hidrograma. Esta consiste no rebaixamento do nível de água da albufeira em antecipação a uma enchente, passando pelo reservatório e descarregadores de fundo o escoamento pertencente ao tramo ascendente do hidrograma. Após a libertação do pico da enchente, as comportas são novamente fechadas, permitindo assim armazenar a água relativamente limpa de sedimentos, correspondente ao tramo descendente do hidrograma de cheia. A parcela do escoamento pertencente à parte descendente do hidrograma, quando

comparada com a parte ascendente, possui concentrações de sedimentos em suspensão significativamente menores (Morris e Fan, 1997; Garcia, 2007).

Segundo Durgunoglu e Singh (1993) e Batuca e Jordaan (2000), este método exige uma previsão em tempo real do hidrograma de cheias. Sloff (1991) acrescenta que, por vezes a previsão do hidrograma torna-se de tal forma difícil, que os operadores em alguns casos começam a encher o reservatório cedo demais, com receio de perder a oportunidade de o fazer por esperar demasiado tempo.

O processo detalhado desta operação é descrito por Morris e Fan (1997) e Garcia (2007), e encontra-se esquematizado na Figura 17, apresentando, quatro fases distintas.

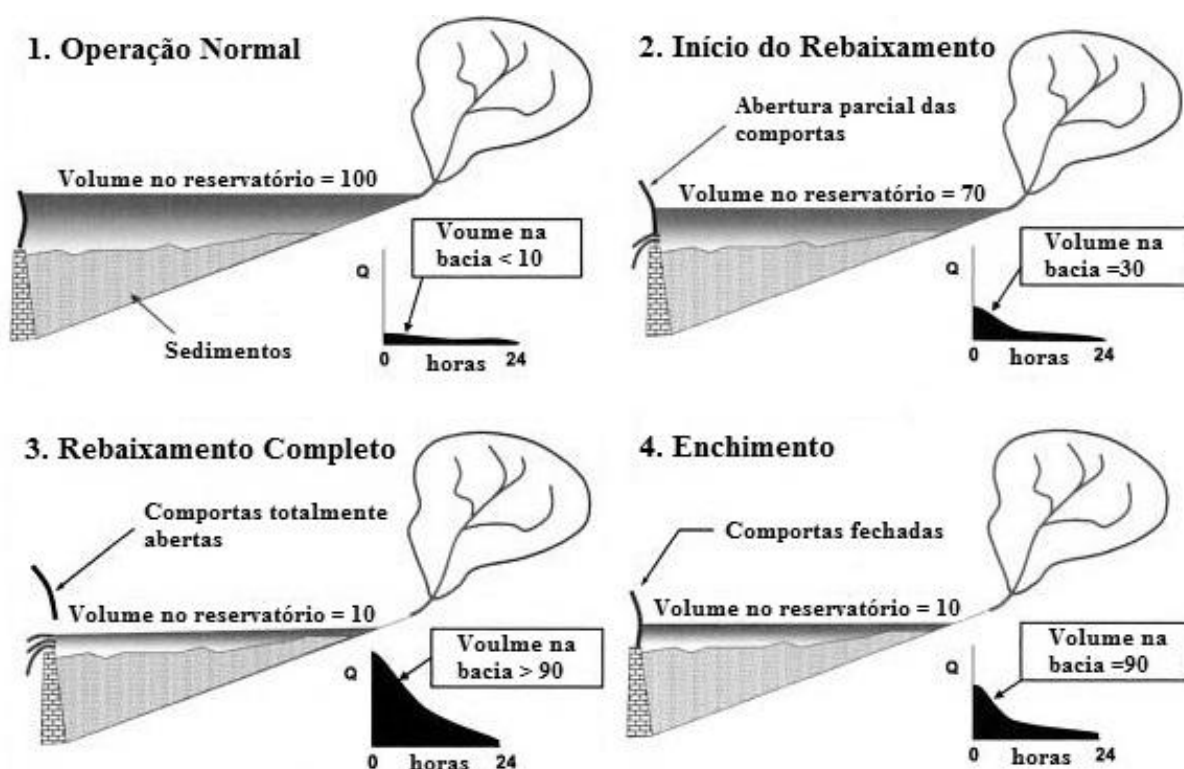


Figura 17. Processo de rebaixamento com previsão do histograma (faseamento) (Garcia, 2007).

1. Operação normal. Entre fenómenos de cheia, o reservatório é operado normalmente, enquanto as previsões meteorológicas são verificadas regularmente com vista a prever a ocorrência de algum evento.
2. Início do rebaixamento. Quando potenciais chuvadas têm início, as comportas da barragem são abertas de forma a rebaixar o nível de água da albufeira até um nível passível de evitar que todo o volume de água presente a montante da barragem, seja inferior ao volume de armazenamento do reservatório.

3. Rebaixamento completo. Este passo é atingido quando todas as comportas estão completamente abertas, proporcionando o nível de água mais baixo e a máxima velocidade de escoamento para a descarga.
4. Enchimento. É realizada uma monitorização constante do volume de água tributado, como tal, assim que o escoamento afluente diminui de intensidade e o volume afluente iguala o volume de armazenamento do reservatório, as comportas são fechadas dando início à captação do escoamento da parte recessiva do hidrograma.

4.2.1.3. Rebaixamento por curva padrão

A técnica de passagem de sedimentos por rebaixamento com base em curva padrão é caracterizada, tal como o nome sugere, por rebaixamento do nível hidrostático no reservatório durante a ocorrência de uma cheia, com a operação dos descarregadores a ser guiada por uma curva padrão (Figura 18) baseada apenas na taxa de vazão da barragem (Morris e Fan, 1997; Garcia, 2007). Opera, tal como as duas medidas anteriores, com o aumento da velocidade de escoamento e consequente aumento da sua capacidade de transporte (Morris e Fan, 1997). A técnica em causa é recomendada em reservatórios hidrologicamente muito pequenos, ou em represas com comportas de grande capacidade.

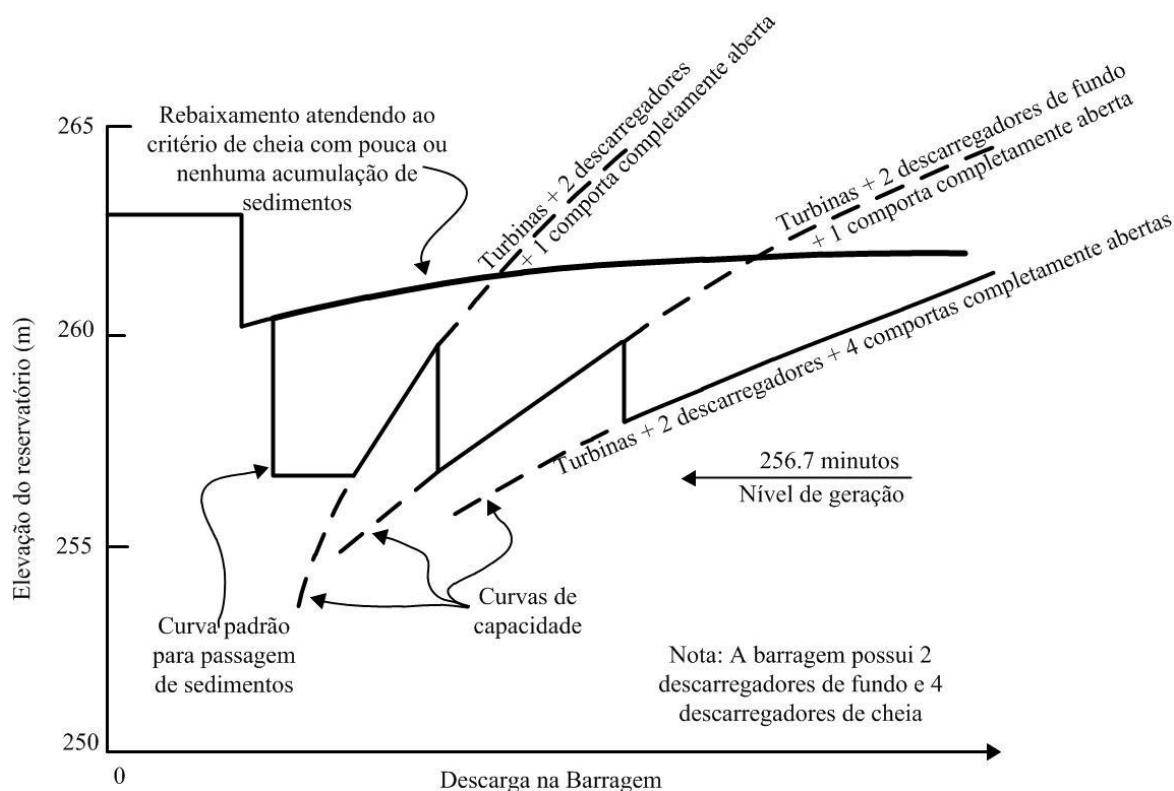


Figura 18. Exemplo de curva padrão a aplicar no processamento de rebaixamento da albufeira (Garcia, 2007).

Maiores tempos de rebaixamento promovem uma acrescida capacidade de transporte sedimentar, conseguindo também transportar eventualmente maiores dimensões de materiais. A quantidade e as dimensões de sedimentos mobilizados, podem ser gerida através da curva padrão, representada pela Figura 18.

4.2.1.4. Passagem de correntes de turbidez

Já definidas anteriormente, as correntes de turbidez, na sua maioria são fenómenos associados a fortes deposições, responsáveis por afectar o correcto funcionamento dos reservatórios e consequentemente os fins a que este é destinado. Felizmente, devido à capacidade destas correntes se deslocarem no fundo do reservatório durante a passagem pela albufeira, com posterior descarga para jusante, pode até certo ponto ser bem sucedida, afigurando-se particularmente benéfica (Dewals *et al.*).

De acordo com Bатуca e Jordaan (2000) e Lameiro e Taveira-Pinto (2009), a corrente ao atingir a barragem, poderá transpor a mesma através da abertura dos descarregadores de fundo (Figura 19a), caso esta os possua, ou poderá fazê-lo pelo vertedouro, caso exista na barragem uma estrutura denominada de cortina (Figura 19b). Em certos reservatórios, o uso desta medida proporcionou numa única enchente a remoção de mais de metade da carga sedimentar presente numa única enchente.

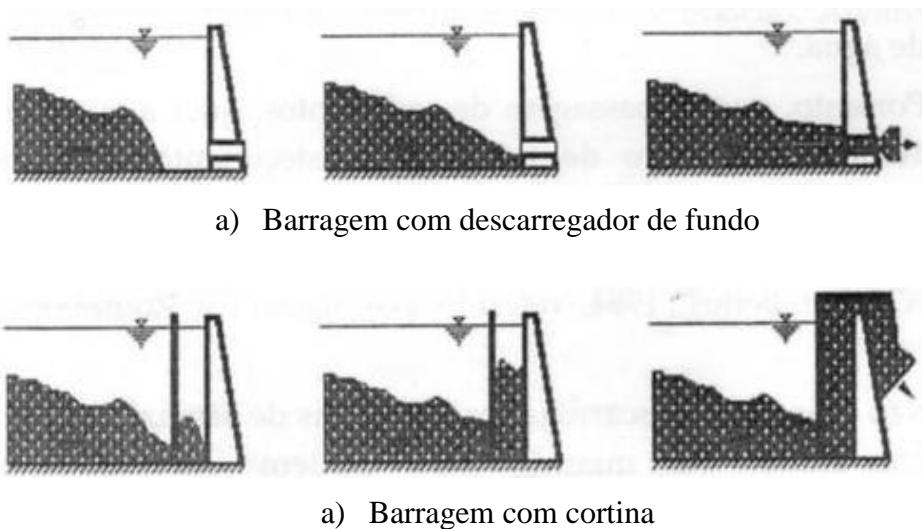


Figura 19. Passagem das correntes de turbidez através da barragem (Bатуca e Jordaan, 2000).

No caso da passagem da corrente se efectuar pelos descarregadores de fundo, o momento de abertura dos descarregadores deve ser coordenado com a chegada da corrente à barragem. Se as comportas forem abertas muito antes da chegada da corrente, ocorrerá a

libertação e desperdício de água limpa. Caso as comportas sejam abertas demasiado tarde, as partículas presentes na corrente irão depositar, prosperando o assoreamento (Yang, 2006).

Sloff (1991) e Durgunoglu e Singh (1993) indicam que os factores que influenciam a eficiência desta técnica dependem essencialmente da topografia do leito do reservatório, forma de operação, localização e capacidade dos descarregadores de fundo, características e comportamento da corrente e nível de água no reservatório. Sloff (1991) considera a passagem de correntes de turbidez com recurso à técnica de passagem de sedimentos (*pass-through ou sluicing*), como a mais eficaz. Situações em que a eficácia desta técnica se verifica, são nomeadamente em reservatório pequenos, com elevados escoamentos afluentes, e reservatórios com concentrações de densidades altas, descarregadores de fundo de grandes dimensões ou grandes capacidades de vazão.

Contudo, a eficiência de passagem tende a decrescer ao longo do tempo, à medida que a deposição de sedimentos preenche o perfil longitudinal do canal, alterando a sua batimetria e dificultando ou mesmo impedindo a propagação das correntes. A acrescentar ao referido, está o facto de a medida não poder ser realizada em todos os reservatórios. Após deixar de ocorrer o escoamento que alimenta a corrente de turbidez a montante, esta pára, e distribui-se ao longo do comprimento do reservatório, depositando-se posteriormente. Esta porção da corrente não é passível de ser descarregada (Morris e Fan, 1997).

4.2.2. Remoção de sedimentos depositados

Podem-se distinguir neste grupo, quatro tipos de técnicas: lavagem hidráulica (*hydraulic flushing*), sifonagem (*syphoning*), dragagem e escavação a seco. Neste conjunto de técnicas, o objectivo principal é a remoção de sedimentos já depositados no fundo das albufeiras. Estas acções promovem principalmente a recuperação da capacidade de armazenamento do reservatório, embora esteja presente também a vertente de passagem de escoamentos sólidos para jusante da barragem, em especial na lavagem de sedimentos e na sifonagem (Durgunoglu e Singh, 1993).

De acordo com Lameiro e Taveira-Pinto (2009), existe uma especial necessidade de aplicação destes métodos, ora porque as estratégias de controlo da deposição nem sempre são aplicadas, ora porque estas não são suficientemente eficazes, permitindo assim a deposição de material sólido.

4.2.2.1. Lavagem hidráulica

Descrita por vários autores, a lavagem hidráulica é caracterizada pela tentativa de recriação das condições naturais de escoamento de um rio, nomeadamente pelo aumento da velocidade de escoamento no reservatório, induzido pela abertura dos descarregadores de fundo e consequente rebaixamento do nível de água na albufeira. Este processo visa a erosão de sedimentos previamente depositados no leito do reservatório, com posterior transporte para jusante, pelos descarregadores de fundo. Desta forma, as operações de lavagem hidráulica realizadas nos reservatórios promovem a redução ou até a estagnação da acumulação sedimentar, para recuperar ou manter a capacidade de armazenamento do reservatório. Têm sido amplamente aplicadas a reservatórios operados para produção eléctrica ou irrigação. De modo geral, é uma técnica aplicada em reservatórios de diferentes tamanhos, mas hidrologicamente pequenos, que possam ser preenchidos rapidamente após o fecho das comportas de fundo. Os reservatórios de maior volume, que tenham sido diminuídos pela acumulação de sedimentos, podem também ser alvos da aplicação desta técnica (Morris e Fan, 1997; Dewals *et al.*, 2010).

Morris e Fan (1997) classifica a lavagem hidráulica em duas categorias, com base no nível de rebaixamento do reservatório. Lavagem com esvaziamento ou lavagem de escoamento livre, para rebaixamentos totais do nível de água, e lavagem com rebaixamento ou lavagem pressurizada, para rebaixamentos menos expressivos.

Por vezes, é gerada alguma confusão na distinção entre as estratégias debatidas na presente secção e as estratégias de passagem de sedimentos (*pass-through*), abordadas anteriormente, na secção 4.2.1. Com efeito, Morris e Fan (1997) definem os principais pontos-chave de distinção entre ambas as técnicas. O primeiro ponto passa inevitavelmente pelo objectivo principal de ambas as estratégias, ou seja, a lavagem procura a remoção de sedimentos previamente depositados, e não apenas os sedimentos presentes no escoamento afluente. No entanto, os sedimentos afluentes ao reservatório durante a execução da lavagem serão igualmente passados para jusante. O segundo ponto diz respeito à concentração de sedimentos presentes no escoamento descarregado para jusante, uma vez que esta concentração é significativamente superior à concentração de sedimentos presente no escoamento afluente. Este facto não se verifica no caso da técnica de passagem de sedimentos, em que a sazonalidade natural de transporte de sedimentos é amplamente mantida ao longo do rio, isto é, a carga sedimentar afluente é semelhante à carga descarregada.

A eficiência da lavagem, segundo Durgunoglu e Singh (1993) e Yang (2006), depende essencialmente da topografia do reservatório, capacidade e elevação dos descarregadores,

características dos sedimentos, operação do reservatório e duração da lavagem. Segundo afirma Dewals *et al.* (2010), os reservatórios com configurações mais estreitas e declives do leito superiores, tendem a apresentar melhores resultados na recuperação da capacidade de armazenamento através do uso destas técnicas. Palmieri *et al.* (2003) focam-se nos descarregadores, referindo que, para além de capacidade suficiente para atingir o esvaziamento, deverão estar localizados próximo do leito original do rio, para que, quando abertos, possam recriar o escoamento em condições naturais. No que diz respeito às dimensões dos sedimentos, nem todas as parcelas da carga sólida de um rio são descarregadas para jusante. Por norma, apenas as siltes de maiores dimensões e as areias são mais facilmente lavadas, ao passo que os sedimentos mais grosseiros são de difícil movimentação e os sedimentos mais finos, como o caso das siltes e argilas, tendem a consolidar após a deposição. A duração de aplicação da técnica varia entre dois dias a uma semana, salvo certas excepções em reservatórios grandes (Dewals *et al.*, 2010).

Existem inconvenientes associados a esta medida, que poderão influenciar a sua eficiência (Morris e Fan, 1997; Dewals *et al.*, 2010). As lavagens hidráulicas implicam o rebaixamento ou esvaziamento do reservatório, que induz desperdício de água capaz de cessar a capacidade de cumprimento das funcionalidades para as quais foi projectado. Deste facto resulta a justificação para a aplicação desta medida em reservatórios hidrologicamente mais pequenos, com maior rapidez de enchimento. As concentrações excessivas de sedimentos descarregados para jusante podem constituir igualmente um problema, dado que estes são passíveis de obstruir certas instalações, como por exemplo canais usados para irrigação e sistemas de arrefecimento industriais. Não obstante, os problemas a nível ambiental, resultantes de elevadas cargas sedimentares, não devem ser subestimados e portanto deve ser realizada uma análise minuciosa a este nível, de acordo com as regulamentações locais. Devido aos impactos mencionados e, de acordo com Shen e Janssen (1999), muitos países não permitem uma passagem de carga sólida superior à afluência da mesma durante um fenómeno de enchente. Dito isto, as lavagens deverão ser executadas essencialmente em épocas de cheias, fazendo uso da capacidade erosiva dos seus escoamentos e evitando a ocorrência de sérios problemas de assoreamento a jusante da barragem.

4.2.2.1.1. Lavagem com rebaixamento

A lavagem hidráulica com rebaixamento ou lavagem pressurizada (*drawdown* ou *pressure flushing*), como o próprio nome indica, implica um rebaixamento do nível de água no reservatório, até um nível mínimo de operacionalidade, mantido constante ao longo da

operação. A súbita abertura dos descarregadores de fundo solta e ressuspende os sedimentos, que são evacuados posteriormente pelo escoamento. Ocorre então a formação de um cone de erosão na vizinhança dos descarregadores, cuja ilustração em planta e em corte está presente na Figura 20.

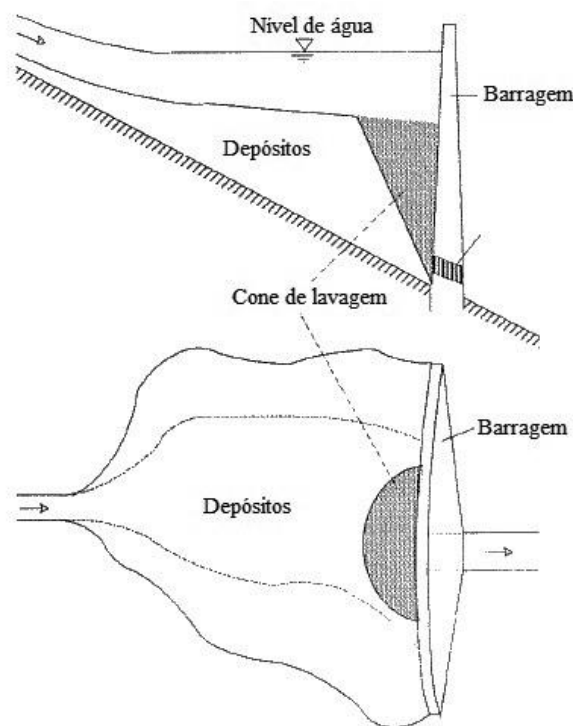


Figura 20. Cone de lavagem, após aplicação da técnica de lavagem com rebaixamento (Sloff, 1991).

Embora a capacidade de transporte aumente com o aumento da velocidade de escoamento, esta será, na maioria dos casos, suficiente apenas para alocar os sedimentos localizados essencialmente no delta, para zonas interiores da barragem, normalmente correspondentes ao volume morto, não criando qualquer tipo de problema que afecte a eficiência do reservatório (Figura 21). Apenas os sedimentos presentes no cone de dejectação serão passíveis de serem descarregados para jusante (Wang e Hu, 2009; Shahmirzadi *et al.*, 2010). Com efeito, Palmieri *et al.* (2003) defendem que em determinados casos, esta componente da lavagem de sedimentos pode ser usada apenas para a movimentação de sedimentos de montante para zonas mais interiores do reservatório, por forma a proporcionar maiores volumes de armazenamento e localizar sedimentos numa posição mais favorável para posteriores lavagens. Nestes casos, existe uma necessidade de efectuar estudos com vista a assegurar que nenhuma tomada de água ou outra estrutura auxiliar seja prejudicada.

Após o cone se ter formado e o transporte de sedimentos ter cessado, a água que flui pelos descarregadores é limpa de sedimentos. De uma forma geral, a geometria do cone de lavagem depende do ângulo de atrito dos sedimentos no leito, afluência e vazão de água e sedimentos, geometria dos descarregadores e características dos sedimentos (Emamgholizadeh *et al.*, 2006).

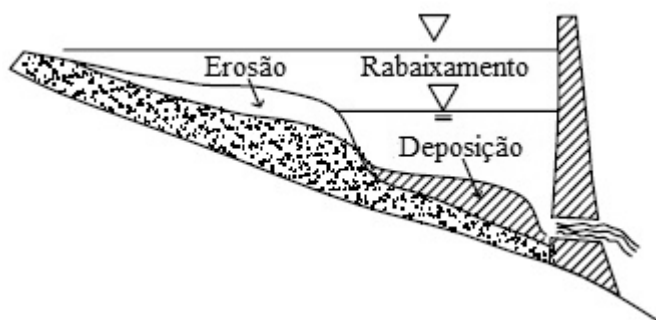


Figura 21. Movimento dos sedimentos na albufeira, após aplicação de lavagem com rebaixamento (Wang e Hu, 2009).

4.2.2.1.2. Lavagem com esvaziamento

Segundo Shen e Janssen (1999), esta técnica requer o esvaziamento do reservatório, o que implica que o nível de água desça abaixo do nível dos descarregadores. Após este nível ser atingido passa a ocorrer um escoamento livre que, como se pode verificar na Figura 22, origina grandes níveis de erosão a jusante do reservatório, imediatamente a montante do descarregador. A erosão progride para montante à medida que o reservatório é drenado, denominando-se erosão regressiva. De acordo com Sloff (1991) e Shen e Janssen (1999), a lavagem com esvaziamento é mais usada do que a lavagem com rebaixamento, uma vez que remove quantidades mais expressivas de sedimentos.

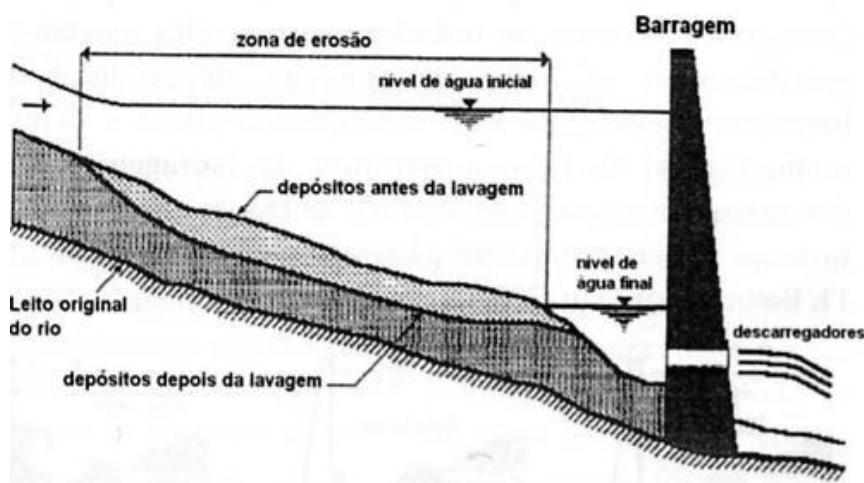


Figura 22. Lavagem de sedimentos com esvaziamento (Batuca e Jordaan, 2000).

O resultado usual deste tipo de lavagem, principalmente em reservatório relativamente estreitos, é a formação de um canal de lavagem, representado em corte na Figura 23 e descrito por Morris e Fan (1997) e Dewals *et al.* (2010). Os depósitos localizados nas laterais deste canal, denominados depósitos submersos de planície aluvial, permanecem praticamente inalterados no que ao equilíbrio deposição/sedimentação diz respeito. Após a finalização da lavagem, o canal formado torna-se parte integrante da capacidade de armazenamento do reservatório, ajudando a encaminhar as correntes de turbidez em direcção à barragem e permitindo a deposição de sedimentos mais finos, o que facilita a evacuação dos mesmos por futuras operações de gestão de sedimentos (Figura 23).

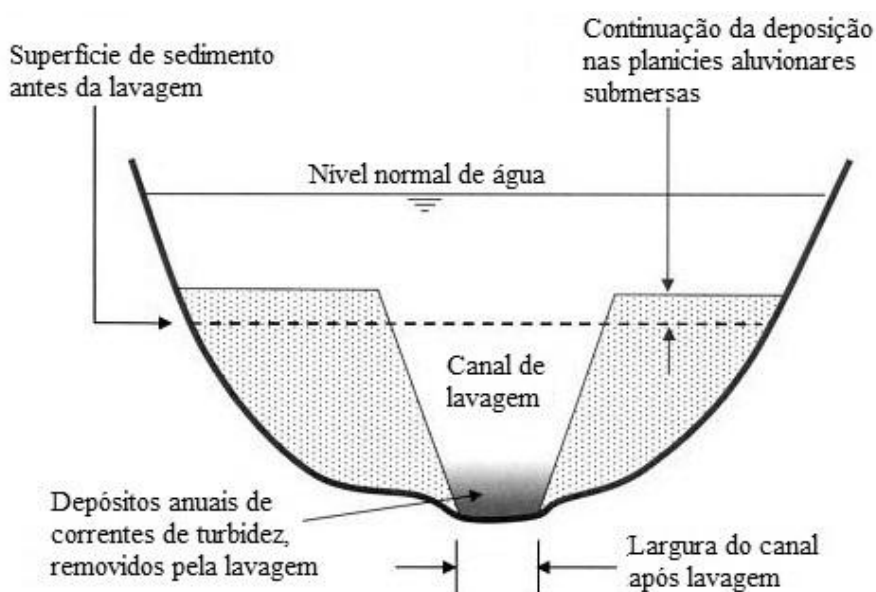


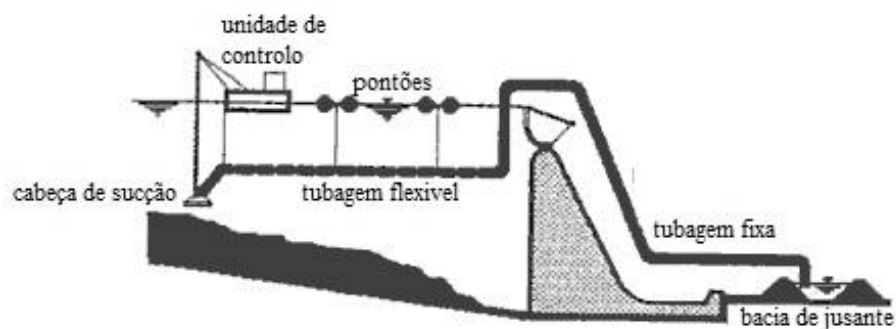
Figura 23. Secção transversal da albufeira, após lavagem com esvaziamento (Garcia, 2007).

Vários autores, citados por Lameiro e Taveira-Pinto (2009), referem que o uso desta estratégia aumenta o risco de falha no abastecimento de água durante os períodos hidrológicos críticos, principalmente em regiões áridas e semi-áridas, onde a lavagem implica a perda de grandes e inaceitáveis quantidades de água.

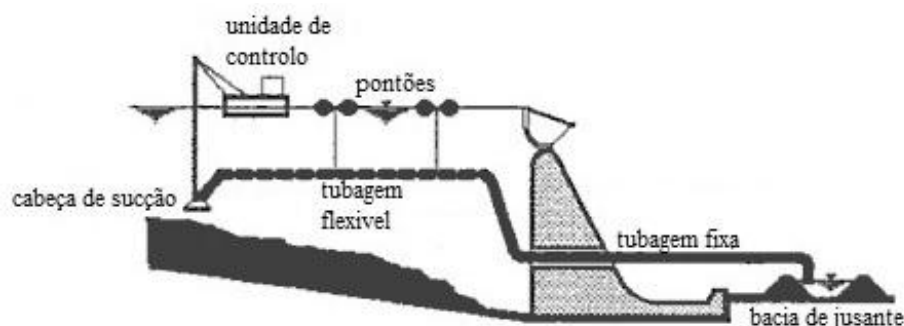
4.2.2.2. Sifonagem

Morris e Fan (1997) incluem esta metodologia na categoria das dragagens, no entanto, para efeitos do presente trabalho, esta será considerada uma categoria distinta. Durgunoglu e Singh (1993) e Batuca e Jordaan (2000) atestam que a sifonagem (*syphoning*) de sedimentos é a estratégia pela qual sedimentos previamente depositados no reservatório são aspirados hidráulicamente e removidos por escoamentos pressurizados, criados por um dispositivo

chamado draga de sucção ou hidroaspirador. À superfície, existe uma espécie de batelão que funciona como unidade de controlo de sucção e descarga das tubagens. Esta unidade de controlo é móvel, possibilitando a deslocação da cabeça de sucção ao longo do reservatório. Esta técnica faz uso da diferença de carga entre os níveis de água de montante e jusante da barragem (Palmieri *et al.*, 2003).



a) Sifonagem por cima da barragem



b) Sifonagem através da barragem

Figura 24. Princípios de funcionamento da sifonagem de sedimentos (Batuca e Jordaan, 2000).

Como é possível observar na Figura 24, existem dois tipos possíveis de execução da sifonagem. Na Figura 24a, a tubagem do sistema passa por cima da crista da barragem e existe a necessidade de uso de uma bomba de vácuo para iniciar o escoamento pressurizado. Na Figura 24b, as tubagens atravessam a barragem pelos descarregadores de fundo e não existe necessidade de recorrer a qualquer tipo de dispositivo para iniciar o escoamento (Batuca e Jordaan, 2000).

Eftekharzadeh e Laursen referidos por Sloff (1991), defendem que a eficiência do sistema utilizado nesta técnica depende essencialmente da dimensão dos sedimentos e do comprimento e dimensão das tubagens.

De acordo com Durgunoglu e Singh (1993) e Batuca e Jordaan (2000), a sifonagem apresenta vantagens uma vez que requer menos água para trabalhar relativamente a outros métodos, é flexível, podendo ser usado em condições de operação variadas, apresenta custos de manutenção e operação baixos e tem grande mobilidade espacial.

No entanto, também se referem desvantagens, como o entupimento das tubagens com sedimentos de grandes dimensões e a ineficácia da técnica em grandes reservatórios. Morris e Fan (1997) e Yang (2006) corroboram a última desvantagem, afirmando que devido à baixa diferença de carga no sistema, a distância entre as extremidades a montante e a jusante não devem ser excessivas, limitando a remoção de sedimentos a zonas relativamente próximas da barragem. De acordo com Morris e Fan (1997), esta distância será variável em função da altura da barragem, diâmetro das tubagens e material a remover. As descargas dos materiais retirados, realizadas no curso do rio a jusante da barragem, constituem igualmente um inconveniente, na medida em que esta prática não é permitida na maioria dos países industrializados, devido a eventuais impactos ambientais.

4.2.2.3. Dragagens

O processo de remoção de volumes significativos de sedimentos depositados em zonas submersas denomina-se dragagem. Morris e Fan (1997) referem que em pequenos reservatórios, esta técnica tem-se focado apenas na remoção de siltes e sedimentos orgânicos originados pela acelerada erosão das bacias e pela eutrofização do ambiente aquático. Relativamente a reservatórios maiores, as operações de dragagem visam fundamentalmente a preservação de áreas específicas e limitadas, como é o caso de tomadas de água, canais de navegação e áreas de recreação. Em alguns casos, o uso de dragagens tem como objectivo a ampliação do reservatório.

Entre as técnicas de dragagem, podem ser reconhecidos vários equipamentos distintos. Como tal, duas categorias são diferenciadas: dragagem hidráulica e dragagem mecânica. Nas dragagens hidráulicas os sedimentos são misturados com água e transportados do ponto de extracção até à zona de descarga, ao passo que nas dragagens mecânicas, os sedimentos são escavados por baldes e elevados até à superfície, sem qualquer tipo de movimentação de águas. O último caso é mais apropriado na remoção de sedimentos grosseiros.

Os custos associados às técnicas de dragagem são por vezes proibitivos, ultrapassando os de remoção de sedimentos por qualquer outra técnica já relatada. Portanto, não é viável a remoção de todos os sedimentos depositados em reservatórios, apenas por meio de dragagem.

As dragagens deverão ser usadas em reservatórios no caso de (Sloff, 1991; Durgunoglu e Singh, 1993):

- A lavagem não ser suficiente, não ser aplicável no reservatório em questão ou consumir demasiada energia na operação;
- A construção de uma estrutura em *bypass* ser fisicamente ou economicamente impossível;
- O reservatório ser insubstituível e a barragem não poder ser elevada.

Nem só os elevados custos de operação constituem as desvantagens destas estratégias pois a nível ambiental existem também fortes inconvenientes. De acordo com vários autores citados por Durgunoglu e Singh (1993), uma das maiores preocupações reside na ressuspensão de sedimentos originada pelas dragagens, visto que estes poderão ser tóxicos. O transporte e eliminação dos materiais dragados constituem igualmente uma grande preocupação, tanto a nível ambiental, como económico, necessitando de medidas adequadas que devem ser encontradas caso a caso (Durgunoglu e Singh, 1993; Palmieri *et al.*, 2003). Sloff (1991) enumera as opções para a eliminação dos sedimentos dragados:

- A jusante, em áreas especiais de armazenamento ou no leito do rio;
- Ao longo das margens do reservatório;
- No volume morto. Aplicável apenas em grandes reservatórios;
- Nas zonas laterais dos afluentes;
- Encaminhar a água lamacenta para fertilização de solos.

Palmieri *et al.* (2003) afirmam que nas descargas realizadas no leito do rio, a jusante da barragem, as altas concentrações de sedimentos associadas às dragagens, podem ser inaceitáveis do ponto de vista ambiental. No entanto, visto que se apresenta como a opção mais económica, o impacto desta pode ser suavizado através de descargas de água limpa para jusante, conjuntamente com a colocação dos materiais dragados.

Nem só de desvantagens são compostas as dragagens. Sloff (1991) expõe que a eficiência das dragagens, isto é, a razão entre o volume de sedimentos retirados e a quantidade de água desperdiçada, é claramente maior do que a das técnicas de lavagem. Com esta técnica, os bancos laterais de depósitos podem ser tratados, o delta pode ser estabilizado e os depósitos de remanso removidos.

4.2.2.3.1. Dragagem de sucção hidráulica

As dragas hidráulicas, equipadas com uma cabeça de corte na extremidade da linha de sucção (Figura 25), são das mais amplamente usadas em reservatórios.

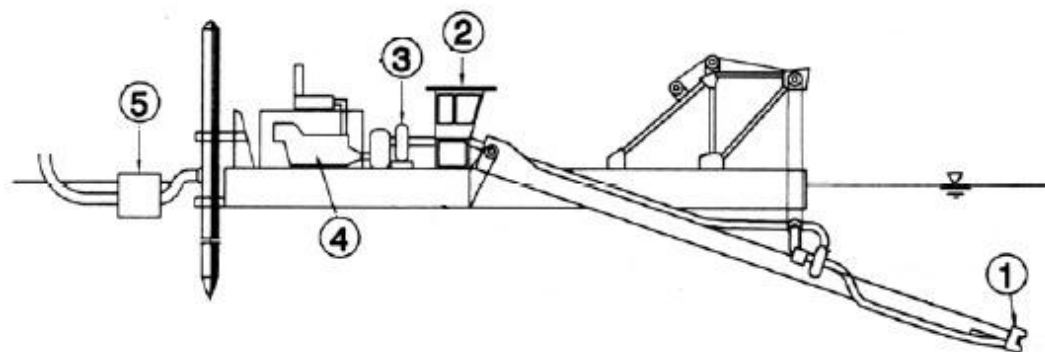


Figura 25. Draga hidráulica (Morris e Fan, 1997). 1 – cabeça de corte; 2 – controlos; 3 – bomba principal; 4 – motor; 5 – canalização flutuante de descarga.

As vantagens deste tipo de dragagem englobam baixos custos unitários de remoção de sedimentos, elevadas taxas de produção, e capacidade de operação com o reservatório a funcionar na sua normalidade. Apresentam uma grande disponibilidade e versatilidade e são extremamente competentes a bombear sedimentos para longas distâncias, quando auxiliadas por estações elevatórias. Todas as parcelas de sedimentos acumulados poderão ser removidas, embora a parcela mais grosseira envolva custos unitários maiores (Morris e Fan, 1997).

A grande desvantagem desta técnica está relacionada com o empolamento dos sedimentos e a necessidade de secagem dos mesmos.

4.2.2.3.2. Bomba de jacto

Numa dragagem deste género, um jacto de água sob pressão é induzido pela embocadura da tubagem, criando uma sucção que mobiliza água e sedimentos. Bombas deste género não possuem partes móveis e como tal, oferecem competência na passagem de sedimentos. São usadas essencialmente em sistemas de *bypass* de areias em zonas costeiras, podendo ser úteis para um efeito similar em reservatórios (Morris e Fan, 1997).

4.2.2.3.3. Bombas de dragagem com cabo suspenso

Morris e Fan (1997) argumentam que este sistema faz uso de uma bomba hidráulica ou pneumática, localizada na extremidade junto ao leito do rio (Figura 26), para a criação de um vortex de sucção, que suga os sedimentos do leito, sem necessidade de recurso a uma cabeça de corte. Contudo, os custos associados ao equipamento usado por esta técnica são consideravelmente superiores ao de um sistema convencional de dragagem hidráulica.

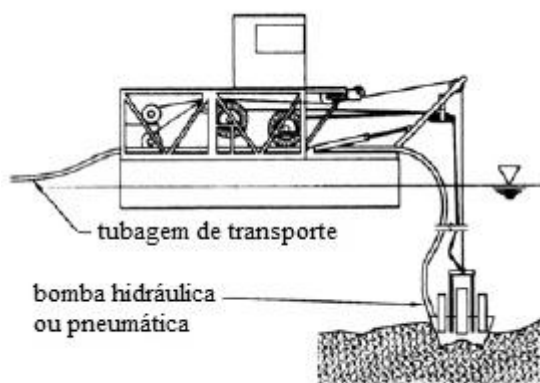


Figura 26. Dragagem com cabo suspenso (Morris e Fan, 1997).

4.2.2.3.4. Dragagem mecânica

As dragagens mecânicas operam escavando sedimentos submersos com recurso a uma espécie de balde. Uma draga equipada com uma garra ou balde aberto, ambos representados na Figura 27, é usada para a escavação, tanto de sedimentos finos como mais grosseiros. De modo a reduzir a geração de turbidez, foi também desenvolvida uma garra totalmente fechada (Morris e Fan, 1997).

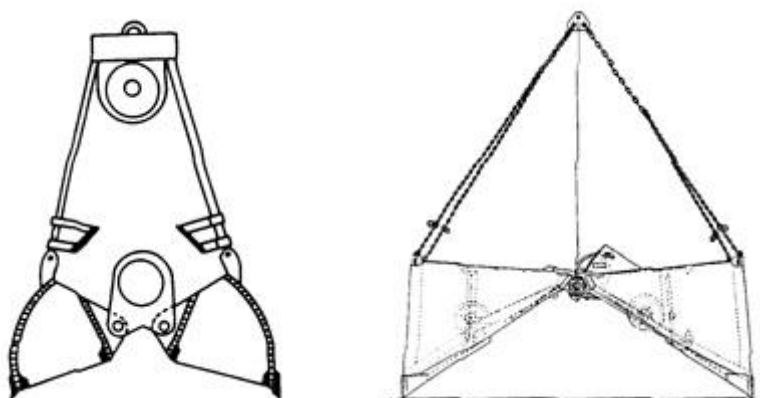


Figura 27. Garra ou balde aberto (Agency, 1994).

Os sedimentos removidos por este tipo de equipamentos são depositados num batelão, atrelado à draga, que será posteriormente rebocado para a margem do reservatório de modo a ser descarregado mecanicamente. Posteriormente, os sedimentos descarregados mecanicamente do batelão, serão transportados para os locais de armazenamento ou eliminação.

Em comparação com as dragagens com recurso a equipamentos hidráulicos, as dragagens mecânicas originam sedimentos com menores quantidades de água, contudo, apresentam uma taxa de produção inferior.

4.2.2.4. Escavação a seco

Fazendo uso de equipamento convencional de movimentação de terras, a escavação a seco requer o esvaziamento do reservatório, durante as épocas secas, quando o escoamento do rio pode ser controlado, de modo a não interferir nos trabalhos de movimentação de terras (Palmieri *et al.*, 2003). Este facto limita o uso desta técnica a empreendimentos que se encontram sazonalmente secos, reservatórios que possam ser esvaziados durante um período de tempo prolongado, ou reservatórios de dimensões muito pequenas, como é o caso das bacias de detritos (Morris e Fan, 1997).

Os custos destes processos têm uma tendência geral para serem mais elevados, quando comparados com as dragagens. Todavia, a escavação e transporte de sedimentos desidratados elimina o carecimento de secagem da mistura lamacenta proveniente das dragagens e reduz o empolamento dos sedimentos. Os requisitos ambientais de licenciamento para operações de escavação a seco podem também ser mais simples. Os custos unitários da operação variam bastante, dependendo do volume de material, distância de transporte e diferença de elevação entre o local de escavação e o de armazenamento.

5. TRABALHOS LABORATORIAIS

Pedro, referido em Ribeiro (2009), defende que os estudos laboratoriais são elementos importantes na compreensão dos diversos efeitos das barragens no transporte sedimentar. Este facto deve-se à pouca exequibilidade de medições em situações reais, de parâmetros como, taxas de deposição, volumes sólidos em transporte, comportamento em situação de cheia, etc. Com efeito, é comum recorrer-se à execução de ensaios laboratoriais de escoamentos na presença de barreiras e fundos com sedimentos, para assim avaliar fenómenos de deposição nos reservatórios.

Visto que o objectivo primordial deste trabalho, passa pela avaliação das medidas de mitigação da deposição de sedimentos em albufeiras, torna-se fundamental conhecer o comportamento dos depósitos em escoamentos do género. Com efeito, foram executados ensaios com vista a analisar os padrões de transporte e deposição dos sedimentos e as possíveis medidas de mitigação.

Nesta secção são expostos e descritos os ensaios efectuados em laboratório no âmbito dos estudos mencionados.

5.1. Condições base

5.1.1. Descrição das condições laboratoriais

Os ensaios laboratoriais foram realizados no canal hidráulico existente no laboratório do Departamento de Engenharia Civil (DECivil) da Universidade de Aveiro (Figura 28). O canal possui uma extensão livre de 10 metros de comprimento e uma secção transversal com, aproximadamente, 0.40 metros de largura.



Figura 28. Canal hidráulico do DECivil.

De forma a possibilitar a afluência de diferentes caudais ao canal, este encontra-se equipado com uma bomba e uma válvula de seccionamento, apresentadas na Figura 29a. Possui ainda, na extremidade de jusante, um sistema de apoio móvel que permite controlar a inclinação do canal (Figura 29b).



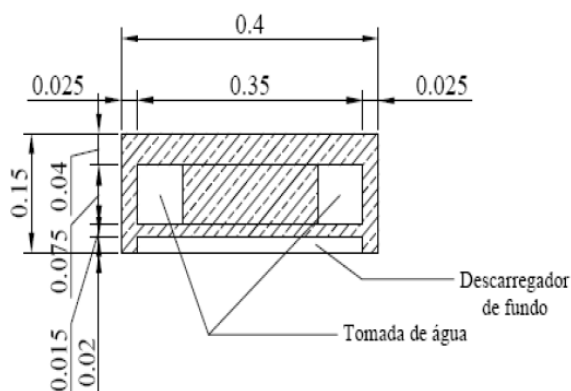
a) Válvula de seccionamento



b) Controlador de inclinação

Figura 29. Equipamento do canal hidráulico.

Situada a cerca de 0.6 metros do ponto mais a jusante do canal, instalou-se previamente um dispositivo que visa simular uma barragem num curso de água. A barragem, cujas dimensões estão especificadas na Figura 30, está equipada com duas tomadas de água e um descarregador de fundo.



a) Esquema



b) Instalação no canal

Figura 30. Dispositivo de simulação de barragem.

A introdução de caudal sólido afluyente ao escoamento foi simulada pelo mecanismo ilustrado na Figura 31. Este dispositivo encontrava-se localizado na zona mais a montante do canal, a cerca de 9.30 metros da barragem e, permite a descarga de areias junto às paredes do canal, representando o caudal sólido que aflui às linhas de água através das zonas marginais. O dispositivo apresentado possui capacidade para 3 kg de areia por garrafa, perfazendo um total de 6 kg, descarregados na linha de água a uma taxa constante de cerca de 0.2 l/s por garrafa, isto é, num total de 0.4 l/s. A descarga dos sedimentos é sincronizada, para que ambos os lados do canal sejam alimentados ao mesmo tempo e com quantidades semelhantes.

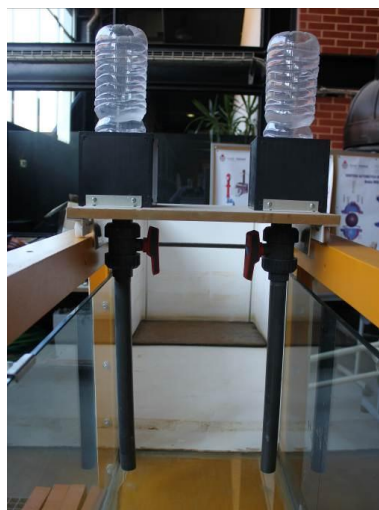


Figura 31. Sistema de descarga de sedimentos.

Para a remoção dos sedimentos após a execução de cada ensaio, o canal foi dividido em 18 trechos de 0.5 metros cada, medidos desde a barragem, restando uma extensão na zona

montante do canal, com apenas 0.40 metros (Figura 32). Os sedimentos foram recolhidos de cada trecho, procedendo-se posteriormente à sua secagem em estufa e pesagem individual.

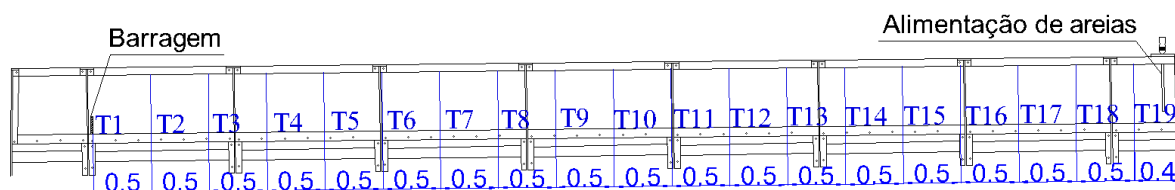


Figura 32. Esquema da divisão do canal por trechos (unidades em metros).

5.1.2. Comportamento geral do escoamento

De uma forma geral, o escoamento em regime livre, passou a ser condicionado pela presença da barragem descrita anteriormente, dando lugar a um escoamento de altura variável, com formação de um ressalto hidráulico na interface de escoamento em regime rápido para regime lento. Enquanto não foi atingido um equilíbrio no escoamento, o ressalto hidráulico evoluiu de jusante para montante até estabilizar. Após a estabilização, foram medidas as alturas de escoamento a montante do ressalto hidráulico e nas imediações do descarregador, procedendo-se de seguida à descarga das areias e à realização do ensaio propriamente dito.

Concluído o ensaio, o sistema de bombagem era desligado cessando o fornecimento de caudal líquido ao reservatório. Como tal, a água ainda presente no canal escoava pelas tomadas de água da barragem, deixando o reservatório praticamente seco. À medida que a água era escoada, ocorria um ligeiro arrastamento de sedimentos principalmente nas zonas de maior acumulação.

Durante a descarga de sedimentos, uma pequena parcela era de imediato transportada pelo escoamento, formando uma espécie de corrente turva, depositando ao longo do fundo do canal, em zonas a jusante da posição do ressalto hidráulico. Esta parcela corresponderia aos sedimentos mais finos presentes na areia seleccionada. No entanto, a maioria dos sedimentos acumulou-se na zona de descarga, sendo transportada gradualmente para a zona de transição entre regime rápido e regime lento.

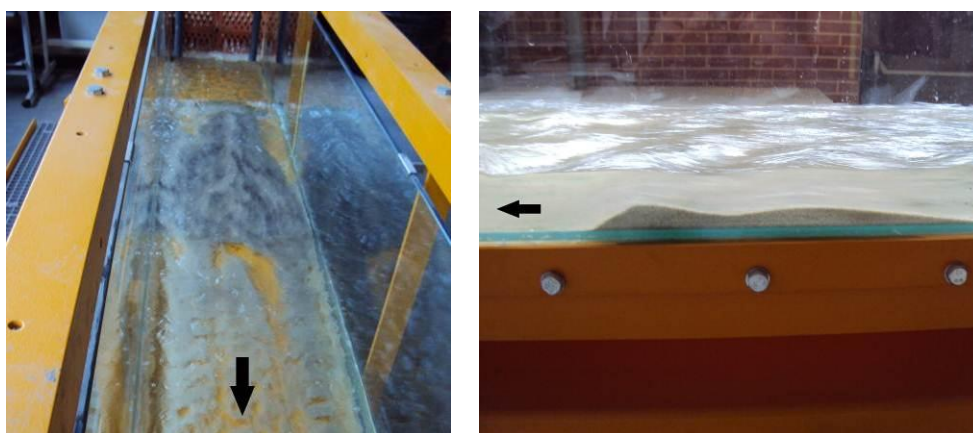
Na ausência de sedimentos no escoamento, em condições padrão de ensaio, o ressalto hidráulico estabilizava, sensivelmente a 8.4 metros da barragem instalada. A partir de certo ponto do canal, a jusante do local de estabilização para o ensaio padrão, o ressalto hidráulico apresentava a configuração ilustrada na Figura 33. Na base deste acontecimento, poderão

estar irregularidades apresentadas pelo canal. Durante o processo de transporte e deposição de sedimentos ao longo do canal e no decorrer do ensaio, observaram-se alguns comportamentos.



Figura 33. Configuração do ressalto hidráulico (trecho 13).

Independentemente da localização do ressalto, a descarga dos sedimentos e a progressão destes para a zona do ressalto, provocava uma perturbação no comportamento do escoamento, verificando-se o desaparecimento de um ressalto hidráulico definido e uma ligeira subida do nível da água nesta zona. O ressalto hidráulico estável dava então lugar a um escoamento instável, com formação de pequenas ondas superficiais.



a) Vista superior

b) Vista lateral

Figura 34. Deposição de sedimentos no canal hidráulico. A seta indica o sentido do escoamento.

Após a maioria das partículas entrar no reservatório, formava-se um corpo de deposição com secção transversal em forma de delta, apresentando uma frente de deposição com um declive bastante acentuado (Figura 34b). Esta frente de deposição migrava gradualmente para jusante, à medida que era alimentada pelos sedimentos erodidos a montante, embora a uma velocidade significativamente inferior. Este resultado era esperado, devido à reduzida

velocidade associada a escoamentos com secções transversais de maior área, por efeito da subida do nível de água no reservatório.

À medida que as partículas se mobilizavam para o interior da albufeira formada pela barragem, ocorria a formação de um novo ressalto hidráulico, imediatamente a montante da formação principal de sedimentos. Este novo ressalto evoluía para jusante com o progressivo transporte dos sedimentos, estabilizando numa posição ligeiramente a montante da inicial (sem introdução de sedimentos). Nenhum sedimento se depositou a montante deste fenómeno hidráulico, como é possível verificar na Figura 34a, devido à capacidade de transporte do escoamento ser superior à carga sólida nele descarregada.

O transporte de sedimentos mostrou-se mais intenso junto às paredes laterais do canal, resultando na acumulação de mais sedimentos na zona central. No entanto, a taxa de transporte não era idêntica em ambos os lados do canal, resultando na formação de duas frentes deposicionais divergentes, com velocidades diferentes de propagação. Quando a transição de regimes de escoamento se deu em pontos localizados a jusante do ensaio padrão, observou-se que a taxa de transporte passou a ser preponderante na zona central do leito, com acumulação de sedimento junto às paredes laterais (Figura 35b).

Os sedimentos depositados além do corpo principal apresentavam-se em maior quantidade e extensão no lado correspondente à frente de delta mais adiantada, o que pode ser justificado pela superioridade da erosão e transporte ocorrida nessa zona. Estes depósitos desenvolveram a formação de pequenas rugas ou dunas com a concavidade contrária ao escoamento (Figura 35a).

Durante todos os ensaios foram constatados pequenos fenómenos de interligações de partículas mais finas com partículas de ar, o que resultou na acumulação das mesmas nas imediações do descarregador, juntamente com poeiras e detritos presentes no escoamento.

As juntas construtivas do canal, representadas na Figura 35c, apresentavam uma descontinuidade na deposição de matéria sólida uma vez que promoviam a acumulação de sedimentos, criando dificuldades na progressão destes para jusante.

Nesta secção, importa referir que as perdas médias de sedimentos registadas, em todos os ensaios realizados no âmbito do presente estudo, rondam os 0.16 %, o que representa 9.82 gramas do total de massa de areias ensaiadas.

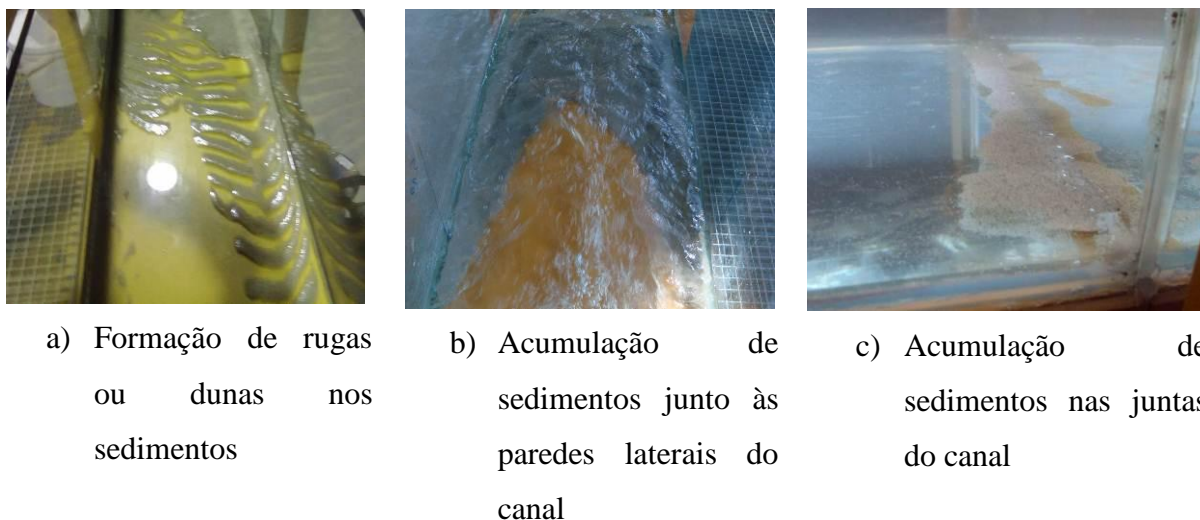


Figura 35. Pormenores dos padrões de acumulação de areias no decorrer dos ensaios.

5.1.3. Ensaio padrão

De modo a possibilitar uma comparação da variação das condições de ensaio nos impactos na deposição de sedimentos foi definido um ensaio padrão. Neste ensaio foi estabelecido o caudal líquido, a inclinação do canal, a dimensão de areias e o tempo de execução adequado ao ensaio. Posteriormente, estas condições foram variadas para a avaliação do comportamento face a cada variável.

5.1.3.1. Caudal líquido

O canal do DECivil permite a realização de ensaios com caudais médios entre os 0.5 l/s e os 16.2 l/s. Por este motivo, optou-se por um caudal de 8.3 l/s para o ensaio padrão, valor sensivelmente próximo da média entre o caudal máximo e mínimo passíveis de serem ensaiados. Desta forma, nos ensaios seguintes pode-se comparar o efeito de existirem caudais menores e maiores do que o caudal do ensaio padrão.

5.1.3.2. Inclinação

Adoptou-se uma inclinação do canal de 1%. Este valor permite também a utilização posterior de inclinações superiores e inferiores, para avaliação do efeito da inclinação do leito, na deposição de sedimentos na albufeira da barragem.

5.1.3.3. Areias

Na realização dos ensaios decidiu-se pela utilização de um único tipo de areia, bem calibrada, de modo a obter um padrão único de transporte de partículas, facilitando a

avaliação dos ensaios. A areia usada, proveniente da Praia da Barra, tem a curva de distribuição granulométrica representada na Figura 36. A peneiração das areias foi realizada segundo a norma ISO 3310-2:2000, com recurso aos peneiros da série entre a abertura de 8 mm e 0.125 mm.

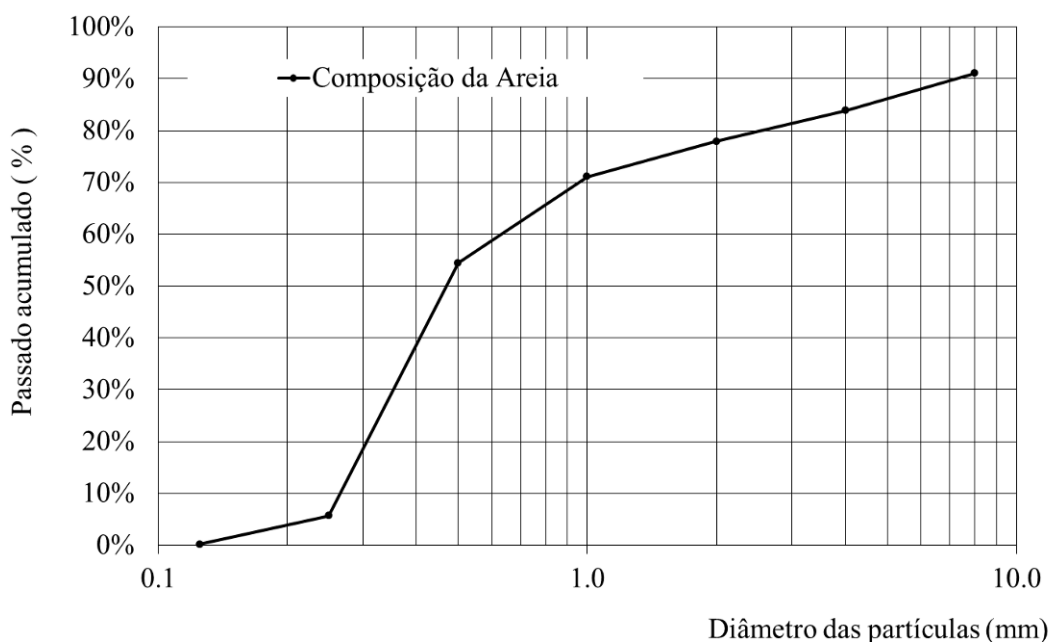


Figura 36. Curva de distribuição granulométrica representativa das areias recolhidas na Praia da Barra.

A gama de areias seleccionada correspondeu aos sedimentos retidos entre o peneiro de abertura 250 μm e o de 500 μm , resultando num d_{50} de 0.375 mm. Esta selecção evitou o uso de sedimentos com dimensões demasiado pequenas, que eventualmente apresentassem características coesivas.

5.1.3.4. Tempo

Para a definição do tempo de execução do ensaio padrão, recorreu-se à elaboração de uma série de experiências nas condições anteriormente descritas, mas com tempos de realização diferentes. Esta primeira série de ensaios teve como objectivo verificar a evolução espacial da massa de areias depositada, quando sujeita a diferentes períodos de tempo de ensaio. Foram realizados sete ensaios, com durações de 10, 30, 60, 120, 240, 480 e 1440 minutos. Esta série foi essencial na definição da duração mais adequada do ensaio padrão, dado que seria necessário obter um tempo de execução do ensaio que proporcionasse

avaliações expeditas e resultados conclusivos. A designação adoptada para referir estes ensaios indica o “P” de padrão e o “T” de tempo, indicando depois o número de minutos de cada ensaio.

À medida que se procedia ao aumento do tempo de ensaio, a formação principal de depósitos apresentou-se bastante móvel, progredindo gradualmente em direcção a jusante. Os sedimentos inicialmente apresentavam-se mais concentrados numa extensão limitada do canal, aumentando a sua distribuição longitudinal de ensaio para ensaio. Estes fenómenos podem ser constatados pela comparação da Figura 38 e Figura 39.

A deposição das areias no interior da albufeira está directamente relacionada com a diminuição da capacidade de transporte do escoamento, por diminuição da velocidade de escoamento, associada ao aumento do nível de água no reservatório. No entanto, o escoamento continua a apresentar capacidade de transporte. Com efeito, o prolongamento do tempo de exposição dos sedimentos à acção do escoamento, resultou numa maior quantidade de partículas transportadas de montante e depositadas a jusante da massa principal de depósitos.

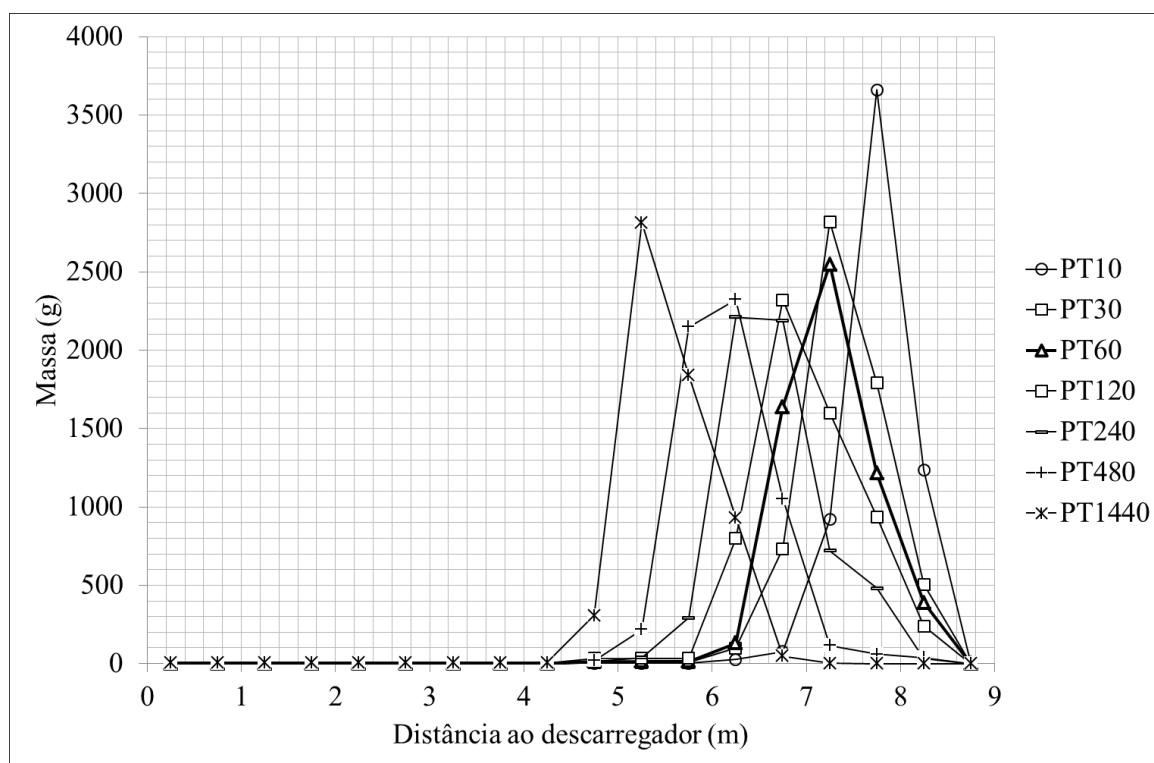


Figura 37. Distribuição da areia ao longo do canal, para diferentes tempos de ensaio.

Os resultados obtidos para a distribuição de massas ao longo do canal estão presentes na Tabela 10 do Anexo I, e são evidenciados no gráfico da Figura 37. Para efeitos de

representação gráfica e de cálculo, considerou-se que toda a massa presente num trecho do canal se encontra concentrada no seu ponto médio.

Todos os ensaios mostram que, há uma zona de pico onde é atingida a massa máxima de depósitos num trecho. De uma forma geral, as massas depositadas a montante do pico de sedimentos são inferiores às massas do ensaio com o menor tempo, enquanto a jusante do pico, as massas depositadas por trecho tendem a ser superiores. Todo este processo pode ser entendido como uma movimentação dos sedimentos para jusante, conforme o aumento do tempo de ensaio.

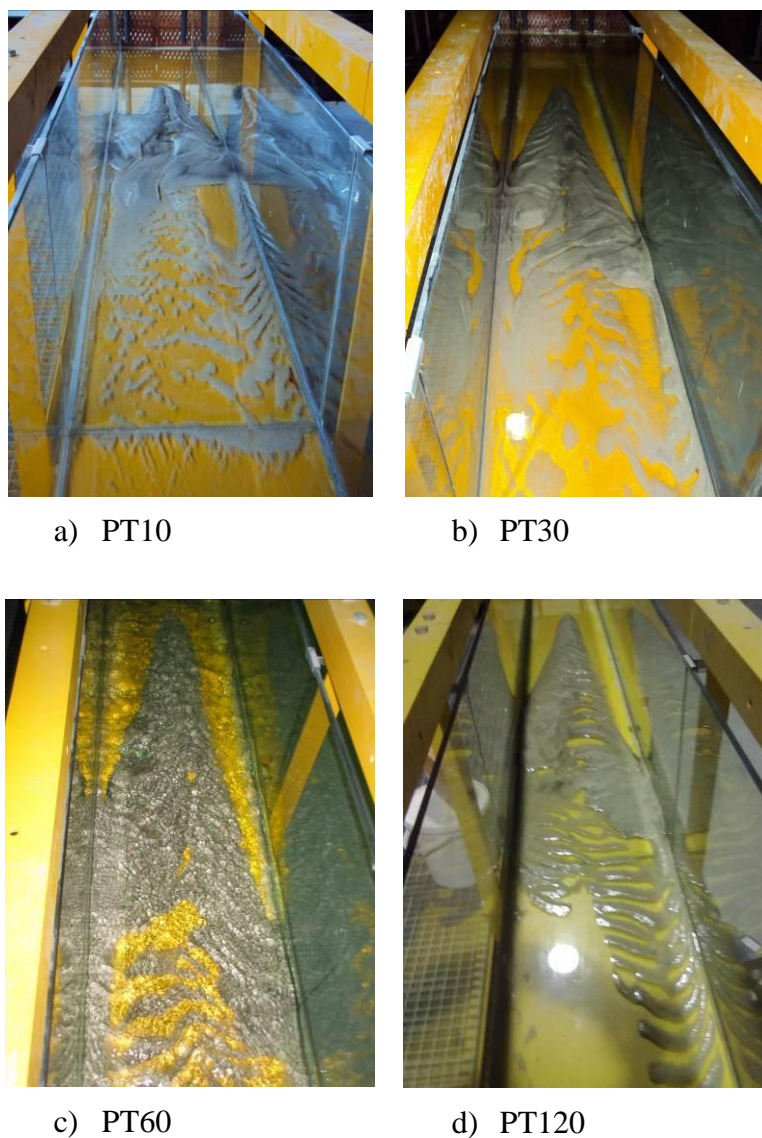


Figura 38. Padrões de deposição do delta, para diferentes tempos de ensaio. Vista de jusante para montante.

O ensaio PT10 apresenta a maioria dos sedimentos entre os 6.5 e os 8.5 metros a montante da barragem, o que implica que a deposição neste ensaio se inicia imediatamente a

jusante do ressalto hidráulico, ocorrendo por excelência nos 2 metros seguintes. Mais de metade da massa de areia depositou-se entre os 7.5 e os 8 metros, o que implica uma maior concentração dos depósitos nesta zona.

Nos casos seguintes, PT30, PT60 e PT120, a distribuição dos sedimentos é similar, com a extensão de deposição a aumentar cerca de um metro em relação a cada um dos ensaios anteriores. Contudo, a massa máxima atingida num só trecho diminui de ensaio para ensaio.

A análise da Figura 38 permite ainda referir que o desfasamento das frentes laterais de deposição foi-se evidenciando com o aumento do tempo de ensaio. No ensaio PT120, na zona de divisão entre as duas frentes do delta formaram-se dunas com a concavidade no sentido do escoamento (Figura 38d).

Nos ensaios PT240 e PT480, a maioria dos sedimentos encontra-se distribuída por dois trechos, deixando de existir apenas um pico de deposição. Ocorre novamente um aumento da extensão de distribuição dos depósitos em relação aos ensaios anteriores, com o primeiro compreendido entre os 5.5 e os 8.5 metros e o segundo com um aumento de cerca de um metro em relação ao precedente.

No ensaio PT1440, volta a distinguir-se um pico máximo de deposição de areias num trecho, atingindo uma massa de 2813.30 gramas, semelhante à do ensaio PT30. A extensão de deposição da maioria das areias ocupa neste caso cerca de 2.5 metros.

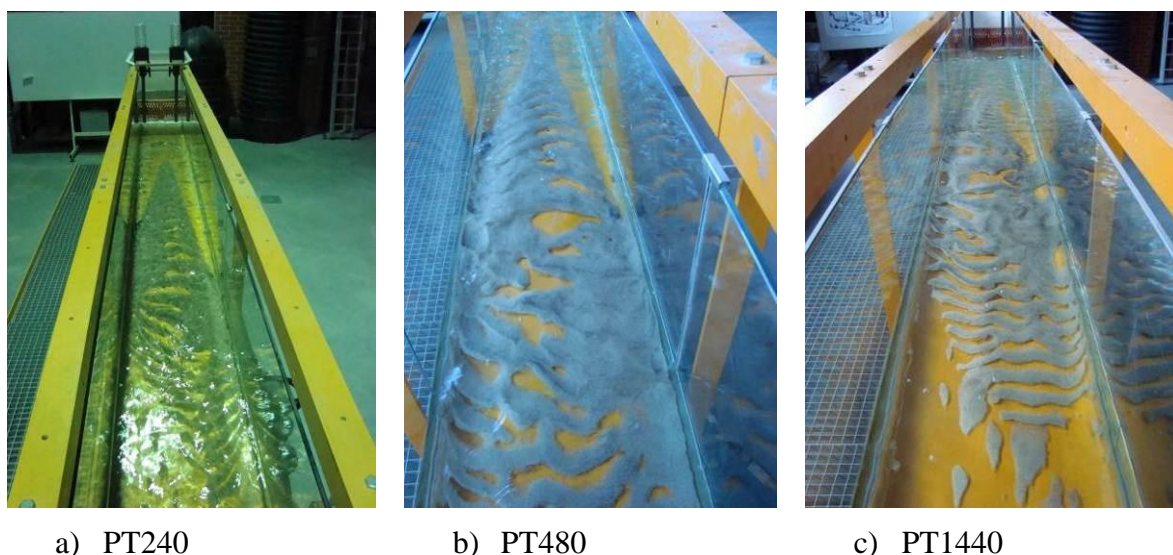


Figura 39. Distribuição dos sedimentos para diferentes tempos de ensaio. Vista de montante para jusante.

Com o aumento do tempo de ensaio, tornou-se mais difícil a avaliação de um padrão de deposição definido, embora alguns comportamentos se possam distinguir (Figura 39). Após

1440 minutos de ensaio, o transporte de partículas ocorria a um ritmo muito mais lento e todo o conjunto de sedimentos apresentava uma distribuição bastante heterogênea, praticamente não se conseguindo diferenciar uma frente de deposição específica. Apesar do maior volume de sedimentos depositados no trecho T11.

Nas tabelas do Anexo I também estão especificados os resultados da posição do centro de massa das areias depositadas ao fim de cada ensaio.

A Figura 40 mostra que o centro de massa das areias vai progressivamente, ao longo do tempo, alterando a sua posição em direcção ao interior do reservatório. As linhas que representam a posição do centro de massa e a posição da frente de deposição apresentam um comportamento logarítmico, com um avanço rápido nos primeiros 40 minutos e tendendo para a estabilização em períodos de tempo mais longos. No ensaio de 1440 minutos, o centro de massa encontrava-se a cerca de 5.5 metros da barragem e a estabilização das areias não estaria ainda totalmente completa, embora não se observassem grandes movimentos. À passagem do minuto 60, a progressão do centro de massa ronda os 50% da sua progressão total nos ensaios realizados.

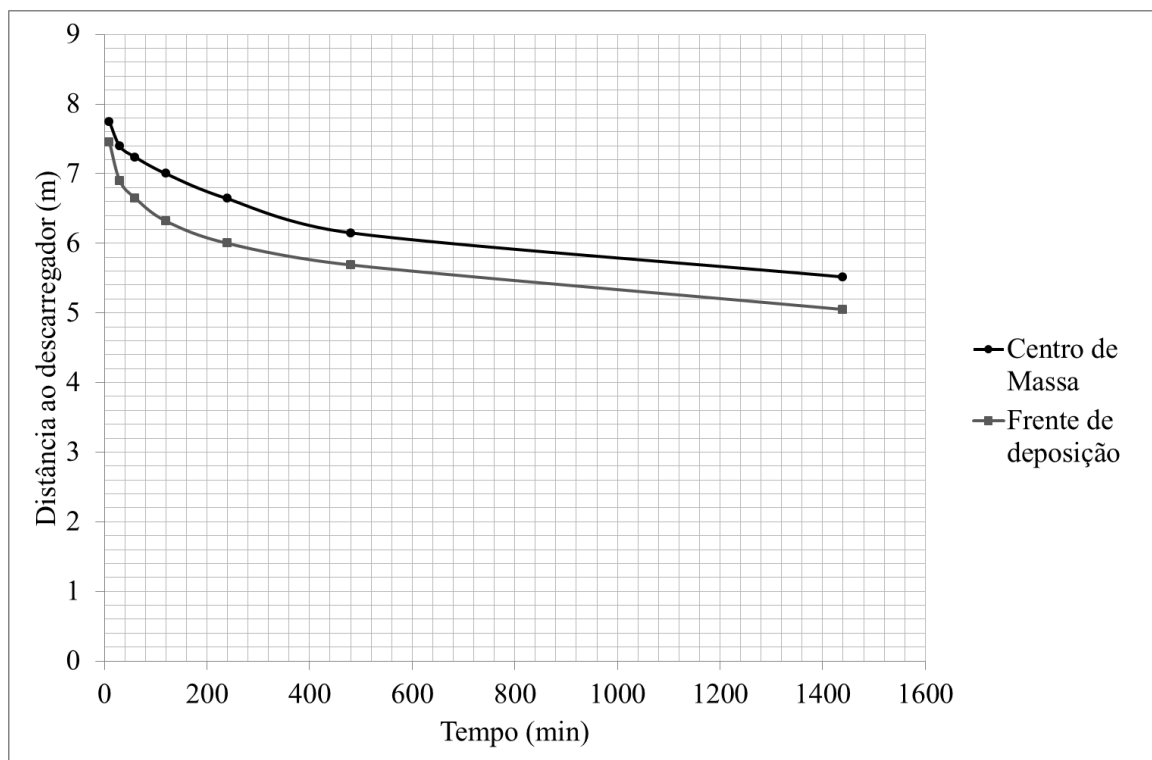


Figura 40. Posição do centro de massa e da frente de deposição de sedimentos, para diferentes tempos de ensaio.

A evolução da frente de deposição acompanha o centro de massa, denotando-se um aumento gradual da distância entre ambos nos quatro ensaios mais curtos, atingindo os 68 cm

de diferença. Com o aumento do tempo de ensaio, a distância diminui novamente, estabilizando na ordem dos 50 cm.

A velocidade média do centro de massa dos sedimentos depositados atinge valores na ordem dos 0.15 m/min para o primeiro ensaio, decrescendo para valores de 0.004 m/min após 60 minutos de ensaio. Nos ensaios seguintes os valores decrescem gradualmente, tendendo para zero (Figura 41).

Os resultados analisados com base nestes ensaios permitem concluir que 60 minutos, será o tempo mais adequado como condição padrão, pois produz padrões de deposição definidos, permitindo uma boa avaliação do impacto da variação das restantes condições, num período de tempo compatível com a realização de diversos testes. Assim sendo, o ensaio PT60, passou a ser designado apenas pela letra P (referente a padrão), nos ensaios de avaliação do transporte e deposição sedimentar e nos ensaios das medidas de mitigação.

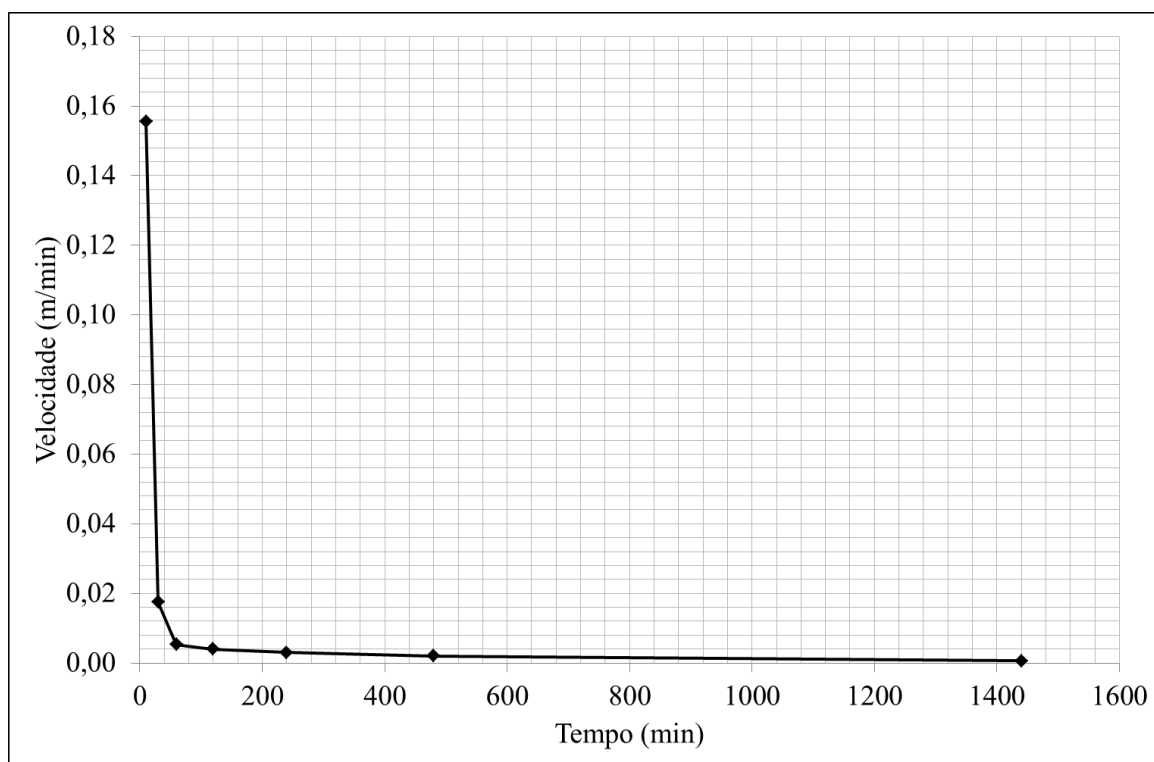


Figura 41. Variação da velocidade do centro de massa dos sedimentos, para diferentes tempos de ensaio.

5.1.3.5. Erro

Para a avaliação dos erros associados à realização dos ensaios, foi repetido o ensaio PT60 com as mesmas condições de escoamento líquido e sólido. Na Figura 42 é exposta a distribuição da massa de sedimentos em ambos os ensaios, e na Tabela 11 do Anexo II, a massa e a percentagem de erro (ou incerteza) associada a cada trecho, respectivamente.

As diferenças verificadas entre os dois ensaios são muito ténues, com a distribuição das areias a ser muito semelhante.

Na Tabela 11 do Anexo II, a estimativa do erro foi realizada tendo em conta o rácio da diferença de massa no trecho, com a menor quantidade de massa nesse trecho, em ambos os ensaios. Registaram-se variações a rondar os 82%, mas associadas a quantidades insignificantes de areia, em trechos com pouca massa depositada. A diferença mais significativa de massa, igual a 127.14 gramas, traduzia a 4.99% num total de 2548.70 gramas no trecho que corresponde ao pico de deposição de sedimentos.

Em ambos os ensaios, os padrões de deposição de sedimentos foram similares. No entanto, uma das frentes de deposição destacou-se ligeiramente do corpo principal desta massa de depósitos. É de notar a formação de pequenas dunas na parte posterior da formação de depósitos, com a concavidade na direcção do escoamento.

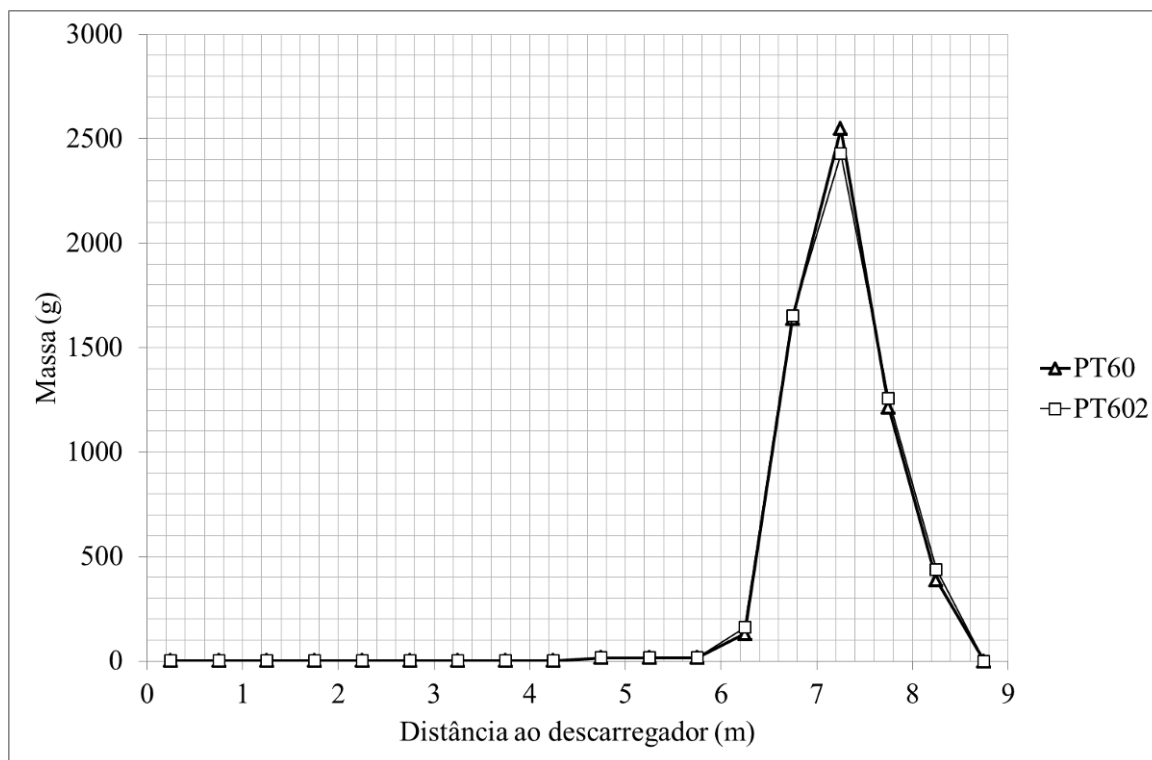


Figura 42. Distribuição da areia ao longo do canal, nas condições do ensaio padrão.

5.2. Ensaio de transporte e deposição sedimentar

O objectivo principal desta série de ensaios passou por avaliar a influência da variação das condições de escoamento sólido e líquido, nos padrões de deposição dos sedimentos na albufeira. Tal como foi referido na secção 3.2, a distribuição sedimentar em escoamentos de reservatório é dependente de uma vasta gama de variáveis. As condições passíveis de

controlar laboratorialmente dizem respeito às dimensões e ao modo de descarga das areias, ao caudal líquido escoado, à inclinação do leito e à forma do reservatório.

5.2.1. Planeamento dos ensaios

Todos os ensaios foram realizados com condições semelhantes ao ensaio padrão, variando apenas um parâmetro de cada vez, correspondendo à variável a avaliar. Logo, a descrição dos ensaios e a análise de resultados será realizada com base na comparação com os resultados do ensaio padrão.

As designações atribuídas aos diferentes ensaios encontram-se expostas na Tabela 3 avaliando diferentes dimensões de areias (PD), caudais (PQ), inclinações (PI), forma do reservatório (PF) e descarga de sedimentos (PC).

Tabela 3. Condições dos ensaios realizados

Designação do ensaio	T (min)	Q (l/s)	I (%)	d ₅₀ (mm)	Forma da albufeira	Descarga de sedimentos
PD750	60	8.30	1.00	0.750	Normal	Lateral
PQ3.65	60	3.65	1.00	0.375	Normal	Lateral
PQ6.28	60	6.28	1.00	0.375	Normal	Lateral
PQ11.67	60	11.67	1.00	0.375	Normal	Lateral
PQ14.76	60	14.76	1.00	0.375	Normal	Lateral
PI0.25	60	8.30	0.25	0.375	Normal	Lateral
PI1.75	60	8.30	1.75	0.375	Normal	Lateral
PF1	60	8.30	1.00	0.375	Alterada	Lateral
PF2	60	8.30	1.00	0.375	Alterada	Lateral
PC	60	8.30	1.00	0.375	Normal	Central

5.2.2. Dimensão das areias

Para avaliar as consequências da dimensão das areias, na respectiva distribuição ao longo do canal, executou-se um ensaio com a gama de areias retida entre o peneiro de 500 µm e 1 mm. Esta areia apresentava um d₅₀ de 0.750 mm, correspondendo a um diâmetro mediano com o dobro da dimensão utilizada no ensaio padrão.

Tanto o comportamento do escoamento líquido e sólido ao longo do ensaio, como os padrões de deposição dos sedimentos, foram semelhantes ao verificado no ensaio padrão. No entanto, a quantidade e extensão de deposição das areias transportadas para jusante do corpo

principal de sedimentação foi consideravelmente menor, com a generalidade das areias a ficar presente no corpo principal de depósitos.

Na Figura 43 é apresentada a distribuição das areias ao longo do canal para o ensaio em questão e para o ensaio padrão, e na Tabela 12 do Anexo III são apresentados os valores concretos das massas de areia para cada trecho.

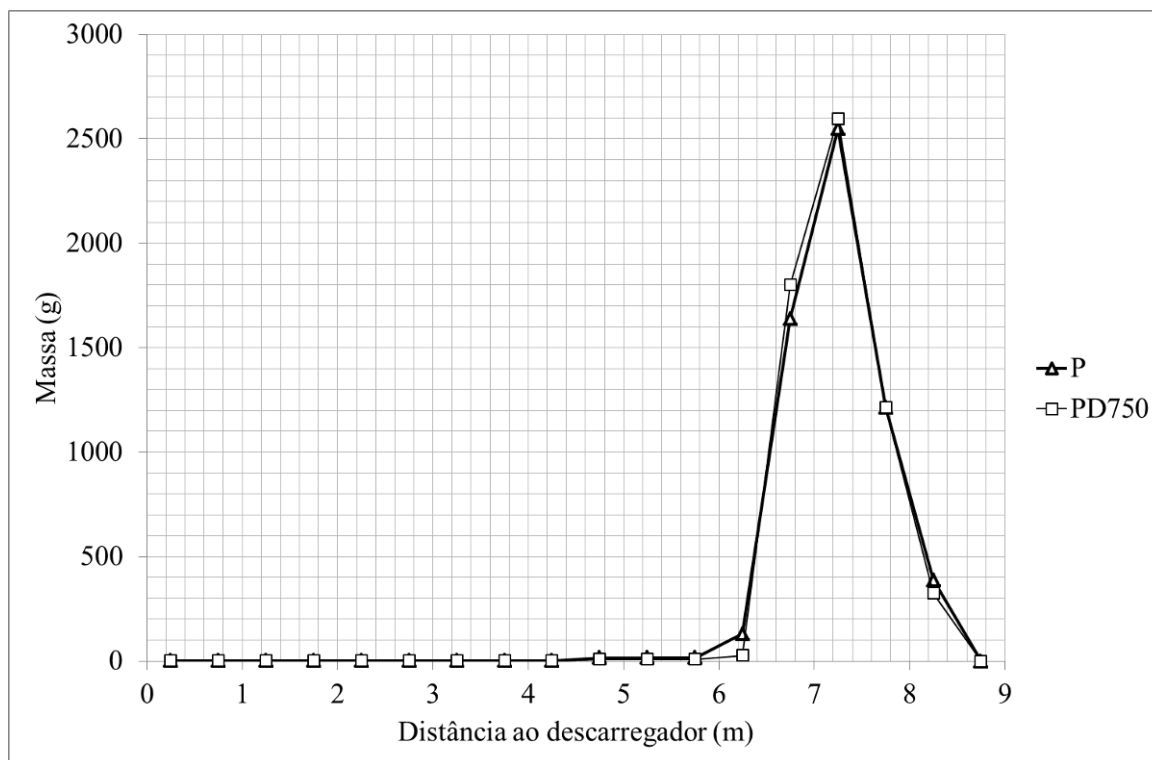


Figura 43. Distribuição das areias ao longo do canal, para o ensaio de variação do d_{50} .

Pela análise da Figura 43 é possível constatar que as configurações dos gráficos são idênticas, o que implica extensões de deposição semelhantes. Registou-se uma variação de pouco mais de 150 gramas, no trecho 14. No trecho a montante, T15, local onde se regista o pico de acumulação de sedimentos, as massas foram parecidas, com o ensaio PD750 a apresentar mais 50 gramas acumuladas. No trecho 13, a massa depositada em cada ensaio apresenta uma diferença de cerca de 100 gramas a menos no ensaio PD750, num máximo depositado nesse trecho de 129.30 gramas. Estes resultados vão ao encontro do observado durante a execução dos ensaios, isto é, a redução da quantidade de depósitos localizados a jusante do corpo principal de sedimentação. O aumento do d_{50} estará na génese do comportamento registado, dado que, aumentando este parâmetro, reduz-se a percentagem de sedimentos mais finos presentes na areia, que seriam transportados para o interior do reservatório com maior facilidade.

Ainda assim, pode-se concluir que o escoamento apresentou uma capacidade de transporte sólido semelhante, para uma dimensão de areias superior, uma vez que a distribuição de sedimentos ao longo do canal foi próxima da verificada no ensaio padrão.

5.2.3. Caudal líquido

Nesta série de ensaios foi testado o impacto da variação do caudal líquido afluente ao canal, recorrendo-se a quatro caudais distintos, dois superiores e dois inferiores ao considerado no escoamento padrão.

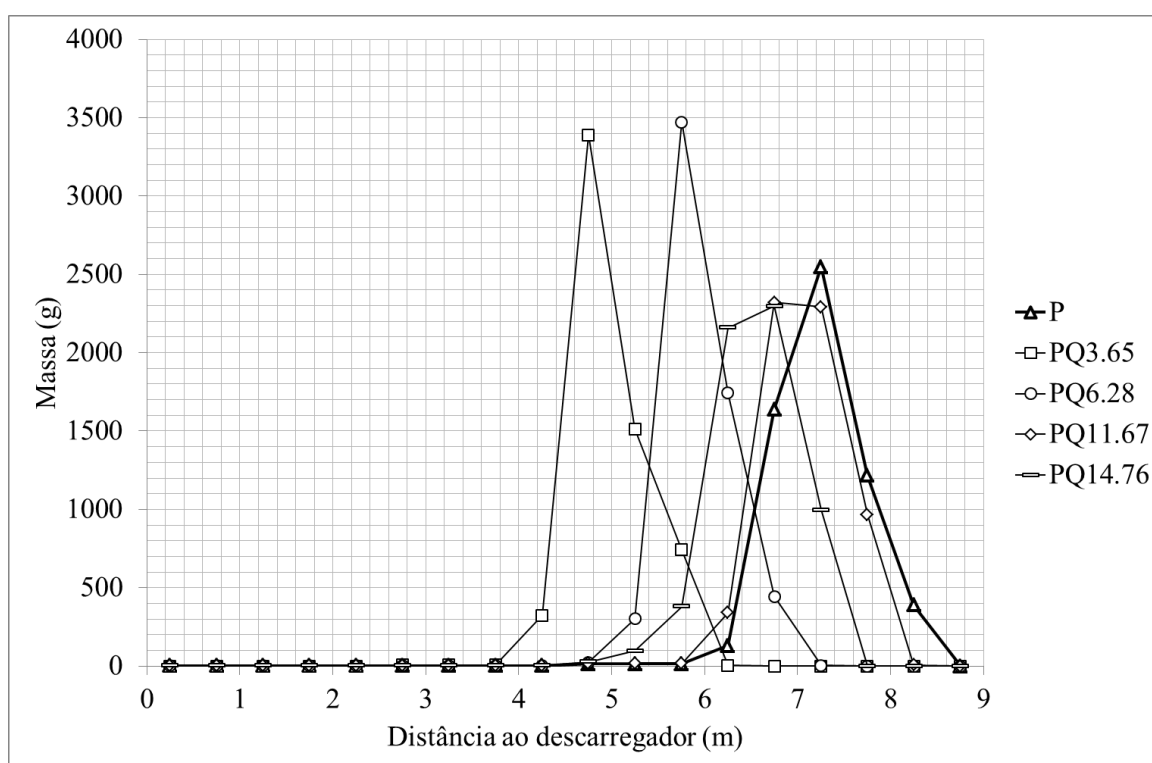


Figura 44. Distribuição das areias ao longo do canal, para os diferentes caudais ensaiados.

A alteração do caudal escoado proporcionou uma modificação óbvia nos padrões de escoamento líquido, que por sua vez induziram uma alteração nos padrões de distribuição dos sedimentos ao longo do canal. A distribuição da deposição dos sedimentos obtida para os ensaios efectuados em função dos diversos caudais, é apresentada na Figura 44.

No gráfico é possível verificar um avanço do corpo principal de deposição, em direcção a jusante, quer para os caudais inferiores ao caudal padrão, quer para os superiores, sendo mais expressivo nos ensaios PQ3.65 e PQ6.28. Logo, o desenvolvimento do corpo de deposição para montante não é proporcional ao aumento do caudal líquido escoado.

Nos caudais maiores, os sedimentos encontram-se mais concentrados, com a maior parte da massa contida em apenas quatro trechos do canal. Os resultados apresentam um pico de deposição a rondar os 3400 gramas, valor superior a metade da massa total de depósitos. Nos ensaios PQ11.67 e PQ14.76, a extensão de deposição significativa permanece confinada também a quatro trechos, no entanto encontra-se mais distribuída. Deixa de existir um trecho com tão grande quantidade de sedimentos e passam a existir dois trechos consecutivos com valores de massa na ordem dos 2000 gramas.

Com o intuito de melhor analisar este comportamento, também é apresentada a variação da posição do centro de gravidade dos sedimentos com a variação do caudal líquido afluente ao canal (Figura 45).

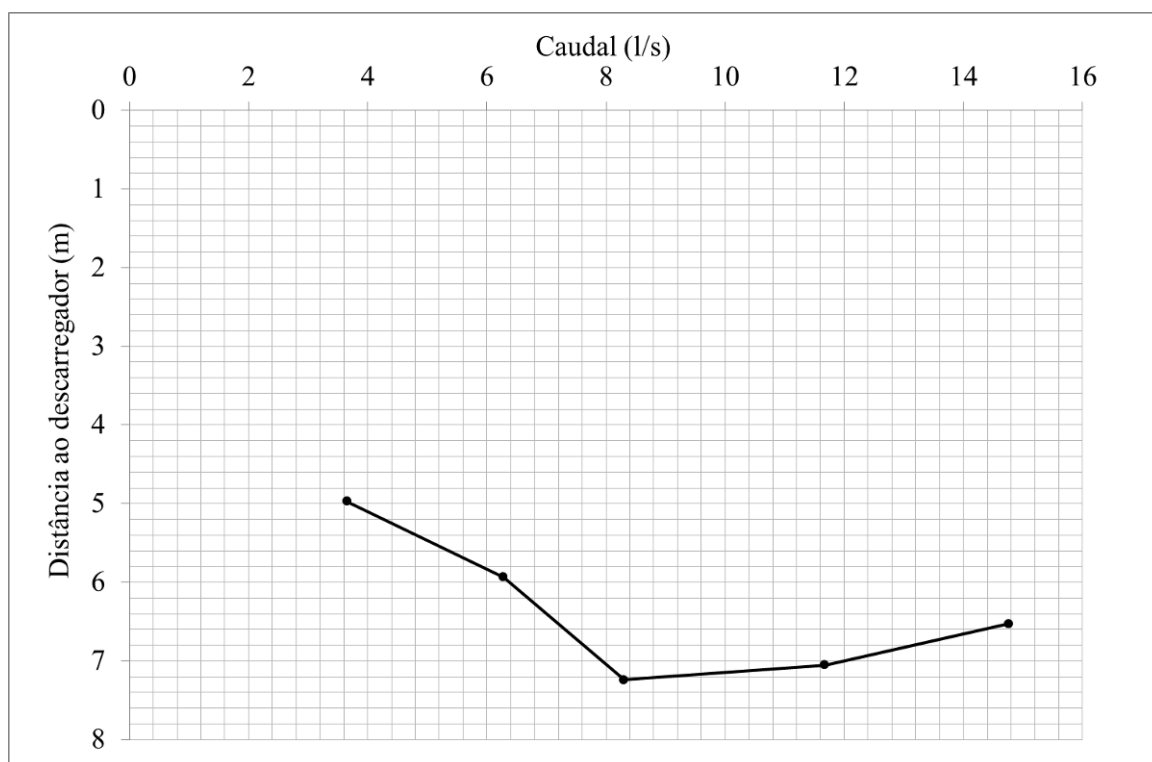


Figura 45. Posição do centro de massa dos depósitos, para os diferentes caudais ensaiados.

Dos 5 ensaios, com caudais distintos, o ensaio padrão é o que produz sedimentos posicionados mais a montante. Os ensaios PQ3.65 e PQ6.28, cujos centros de massa das partículas se localizam a 4.97 e 5.94 metros, da barragem respectivamente, proporcionam depósitos localizados mais a jusante, com o avanço a ser proporcional à diminuição do caudal. Para escoamentos com um débito líquido superior ao padrão, o centro de gravidade dos sedimentos desloca-se igualmente para jusante, proporcionalmente ao aumento do caudal, embora com menor expressão.

Seguidamente, tenta-se avaliar o comportamento específico registado em cada ensaio.

5.2.3.1. Caudais de 3.65 e 6.28 l/s

Nos ensaios PQ3.65 e PQ6.28, o ressalto hidráulico estabilizou em posições mais a jusante do que no caso do ensaio padrão, localizando-se respectivamente a 6.04 e 7.07 metros da barragem, o que implicou uma maior extensão de escoamento em regime rápido. Foi também possível observar que a altura de água junto à barragem e a montante do ressalto era menor. Após a estabilização do escoamento, executou-se a descarga dos sedimentos e verificou-se que a dinâmica de transporte se assemelhava à do ensaio padrão. No entanto, o transporte das areias até à zona de transição entre regime rápido e lento foi mais demorado e gradual, em especial no ensaio do menor caudal.

Em ambos os ensaios, a deslocação do ressalto hidráulico para jusante, estará na origem da localização dos sedimentos a jusante da posição medida no ensaio padrão, devido à maior velocidade e consequente maior da capacidade de transporte sólido, do escoamento em regime rápido. Com efeito, a posição do ressalto hidráulico, quanto mais próxima ficou da barragem, mais a jusante se localizaram os depósitos gerados.

As grandes diferenças entre estes ensaios e o ensaio padrão registaram-se no comportamento sedimentar, após a formação do corpo principal de deposição, e a estabilização do escoamento líquido. Importa mencionar que nesta fase dos ensaios ocorreu a formação de uma única frente de deposição, ao invés de duas.

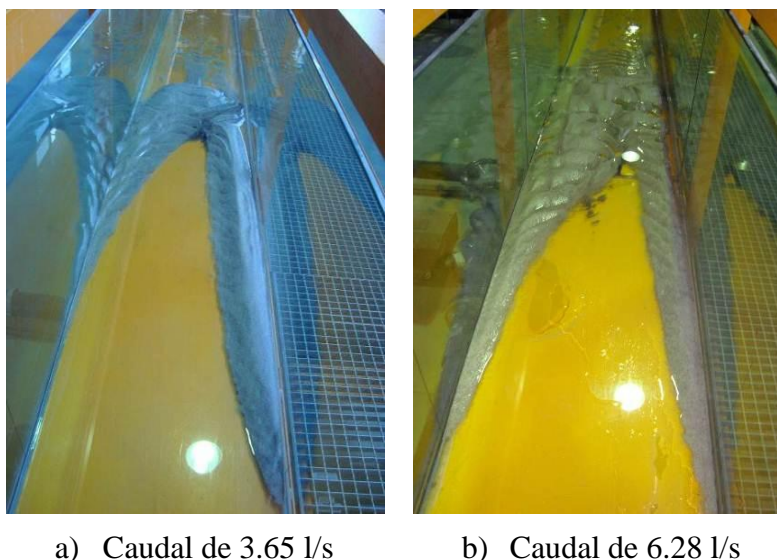


Figura 46. Formação de depósitos junto às paredes do canal, após a finalização dos ensaios de caudais menores. Vista de montante para jusante.

Constatou-se que a taxa de deposição junto às paredes do canal continuou a ser distinta de uma lateral para a outra, como se pode verificar na Figura 46.

O ensaio PQ6.28 apresentou maior heterogeneidade na distribuição dos sedimentos e uma frente de deposição com maior quantidade de sedimentos, quando comparado com o ensaio PQ3.65, facto apoiado pela diferença de 83.4 gramas entre picos. A formação de pequenas rugas no corpo principal de depósitos foi também registada, embora com maior expressão no ensaio de maior caudal. Em ambos, a quantidade de areias depositadas a jusante da formação principal de depósitos, diminuiu. O ensaio PQ6.28 apresentava maior concentração nessa zona, com formação de rugas semelhantes às ocorridas no ensaio padrão.

5.2.3.2. Caudais de 11.67 e 14.76 l/s

O ressalto hidráulico, nos ensaios PQ11.67 e PQ14.76, progrediu para montante, estabilizando a 8.83 e 8.90 metros da barragem, respectivamente. A movimentação para montante, do ressalto hidráulico, limitou a extensão de escoamento em regime rápido. O nível de água na zona da barragem também se viu aumentado, com uma parte do caudal a ser escoado sobre o descarregador.

Após a descarga de sedimentos no escoamento, a dinâmica de transporte em ambos os ensaios foi semelhante ao ensaio padrão. A distribuição das partículas ao longo do canal mostrou-se levemente alterada. O ensaio PQ11.67 assumiu uma distribuição mais parecida com o ensaio PT120, e o PQ14.76 com o ensaio PT240, representando uma relação entre o caudal com efeitos similares ao aumento do tempo de ensaio. No entanto, os sedimentos encontravam-se concentrados numa extensão menor e apresentavam uma zona posterior da formação principal com menor comprimento. A quantidade de sedimentos de menor dimensão, transportados para jusante das frentes deposicionais, aumentou, mantendo a configuração dunar junto a estas.

Entre estes ensaios, as configurações não variaram muito, notando-se apenas que a maioria da deposição do ensaio PQ14.76 se localizava numa zona mais a jusante do que no ensaio PQ11.67. Na Tabela 12 do Anexo III, verifica-se que as massas acumuladas por trecho de canal se assemelham entre estes dois ensaios. No entanto, as massas do ensaio PQ14.76 estão desfasadas 0.5 metros para jusante do resultado do ensaio PQ11.67.

Nestes dois casos, a movimentação das areias para regiões a jusante do ensaio padrão, estará relacionada com o incremento da velocidade de escoamento e consequente capacidade de transporte, na zona de regime lento, associadas ao aumento dos caudais líquidos escoados no canal.

5.2.4. Inclinação

O teste da influência da inclinação do canal foi executado para duas inclinações distintas, uma superior e outra inferior, com uma diferença de 0.75% da inclinação padrão. Ambos os ensaios apresentaram consequências visíveis no escoamento líquido e no transporte e deposição de sedimentos.

No caso da inclinação superior, a estabilização da posição do ressalto hidráulico ocorreu a 4.57 metros da barragem, a jusante da posição no ensaio padrão. A altura de escoamento, a montante do ressalto, decresceu cerca de 5 milímetros, ao passo que, junto à barragem, permaneceu próxima da registada no ensaio padrão.

Toda a carga sólida foi rapidamente transportada para jusante, formando uma corrente turva de sedimentos. Os sedimentos mais finos avançaram para o interior do reservatório, iniciando uma deposição uniforme em zonas a jusante da transição de regimes de escoamento. A distância de alcance dos sedimentos foi mais expressiva do que no ensaio padrão. Os restantes sedimentos, depositados à entrada do reservatório, formaram um depósito em forma de delta (Figura 47), semelhante ao formado nos ensaios PQ3.65 e PQ6.28.

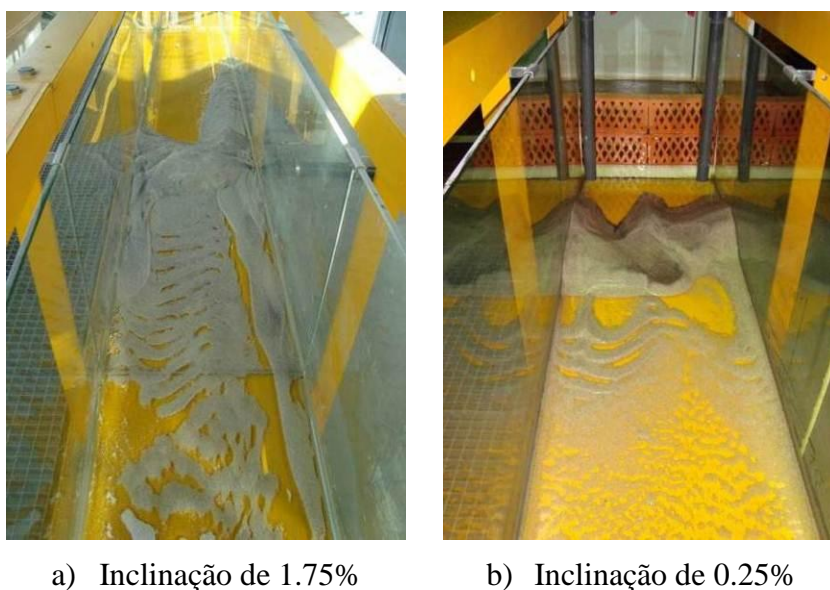


Figura 47. Formação dos depósitos após a finalização dos ensaios de variação da inclinação. Vista de jusante para montante.

Para o ensaio PI0.25, com inclinação de 0.25%, o ressalto hidráulico não se formou no canal, uma vez que a progressão do ressalto para montante, foi superior à extensão de canal existente.

A maioria dos sedimentos, de dimensões superiores depositou-se de imediato no ponto de inserção e não apresentou movimento significativo ao longo do ensaio. No entanto, a movimentação das partículas presente neste aglomerado de sedimentos, deu origem à formação de dunas, com a concavidade no sentido contrário ao escoamento, visíveis na Figura 47b.

Na Figura 48 são apresentados os resultados da distribuição das areias ao longo do canal, comparados com a distribuição obtida no ensaio padrão.

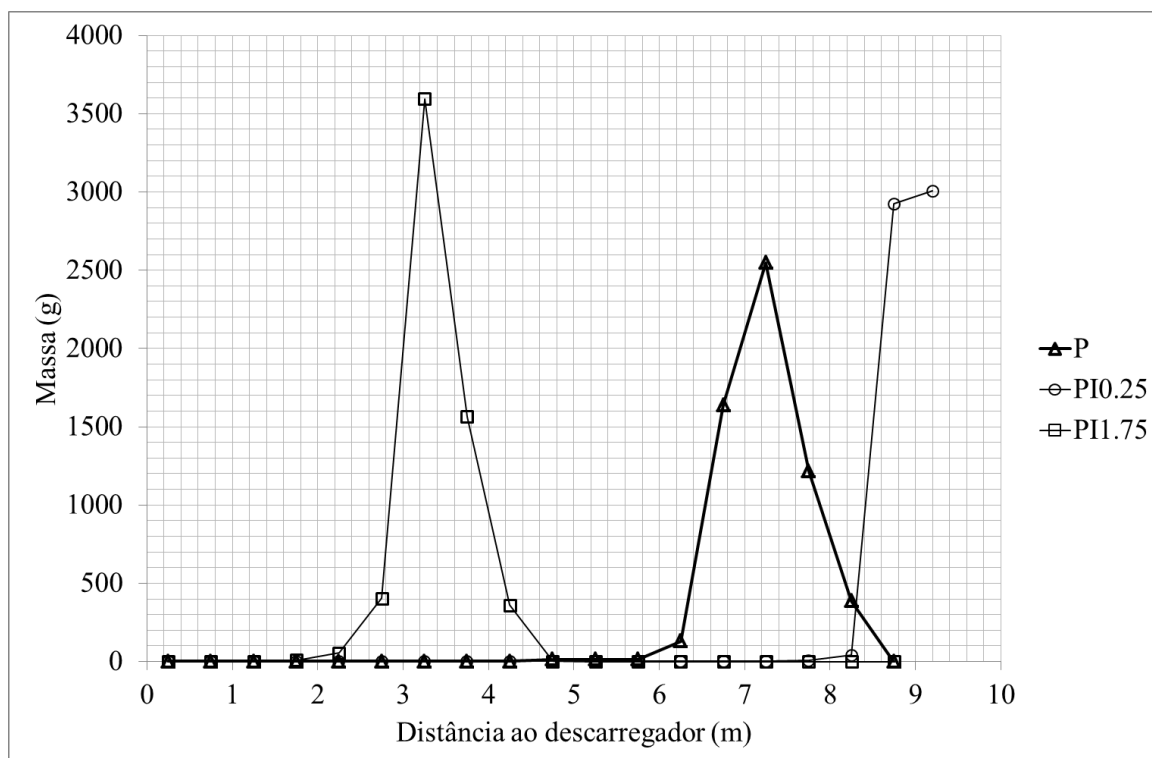


Figura 48. Distribuição das areias ao longo do canal, para as diferentes inclinações ensaiadas

No ensaio PI1.75, grande parte das areias progride no canal, com o centro de massa a apresentar-se 3.85 metros a jusante do centro de massa do ensaio padrão. A configuração do resultado gráfico deste ensaio é semelhante aos ensaios de variação de caudais, PQ3.65 e PQ6.28, com a particularidade do pico apresentar uma massa depositada de 3596 gramas, ligeiramente superior aos ensaios mencionados.

No ensaio PI0.25 a grande maioria da deposição está confinada essencialmente aos trechos T18 e T19, correspondendo a aproximadamente 99% do total de massa depositada.

Nestes dois ensaios, a existência e localização do ressalto hidráulico é preponderante na localização dos sedimentos. No caso do ensaio com inclinação do canal superior à inclinação padrão, o avanço do ressalto para jusante, resultou num aumento da extensão de escoamento

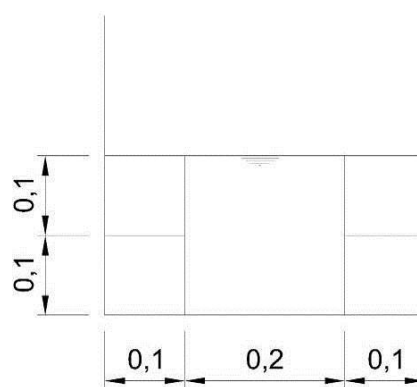
em regime rápido, e os sedimentos foram transportados para as zonas mais próximas da barragem. Com a diminuição da inclinação, como não ocorreu formação de ressalto hidráulico, os sedimentos foram descarregados num escoamento em regime lento, onde a capacidade de transporte é inferior, devido à reduzida velocidade do escoamento.

5.2.5. Forma do reservatório

Para a realização destes ensaios, a alteração da forma da albufeira foi levada a cabo através do estrangulamento da zona imediatamente a montante da barragem, com a colocação de vigas de betão com $10 \times 10 \times 60 \text{ cm}^3$ junto à barragem.



a) Vista frontal

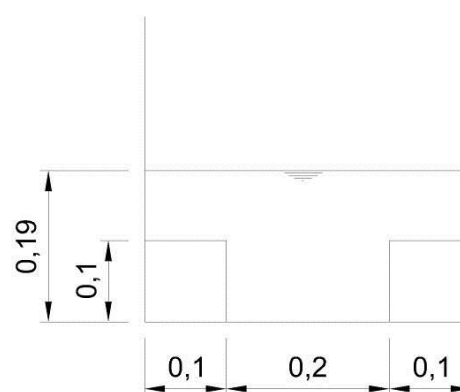


b) Esquema de secção transversal

Figura 49. Modelo de alteração da forma da albufeira, no ensaio PF1.



a) Vista lateral



b) Esquema de secção transversal

Figura 50. Modelo de alteração da forma da albufeira, no ensaio PF2.

Foram testadas duas disposições diferentes das vigas de betão. No primeiro caso, PF1, foram colocadas duas vigas sobrepostas encostadas a cada lateral do canal, criando uma

secção de escoamento com apenas 20 cm de largura para uma altura de igualmente 20 cm e prolongando-se para montante numa extensão de 60 cm, como mostra a Figura 49. No ensaio PF2, ilustrado na 0, optou-se pela colocação de três vigas de betão alinhadas nas laterais do canal, criando uma secção de 20 cm de largura para apenas 10 cm de altura, numa extensão de 180 cm.

As alterações da forma da albufeira causaram efeitos no escoamento líquido de ambos os ensaios, particularmente no comportamento do ressalto hidráulico. De forma semelhante ao ensaio PI0.25, não ocorreu formação do ressalto hidráulico nos limites do reservatório. A jusante, nas imediações da barragem, o nível de água registado foi superior, ocorrendo escoamento sobre a barragem. Os níveis de água a montante e a jusante, no ensaio PF1, foram superiores ao ensaio PF2.

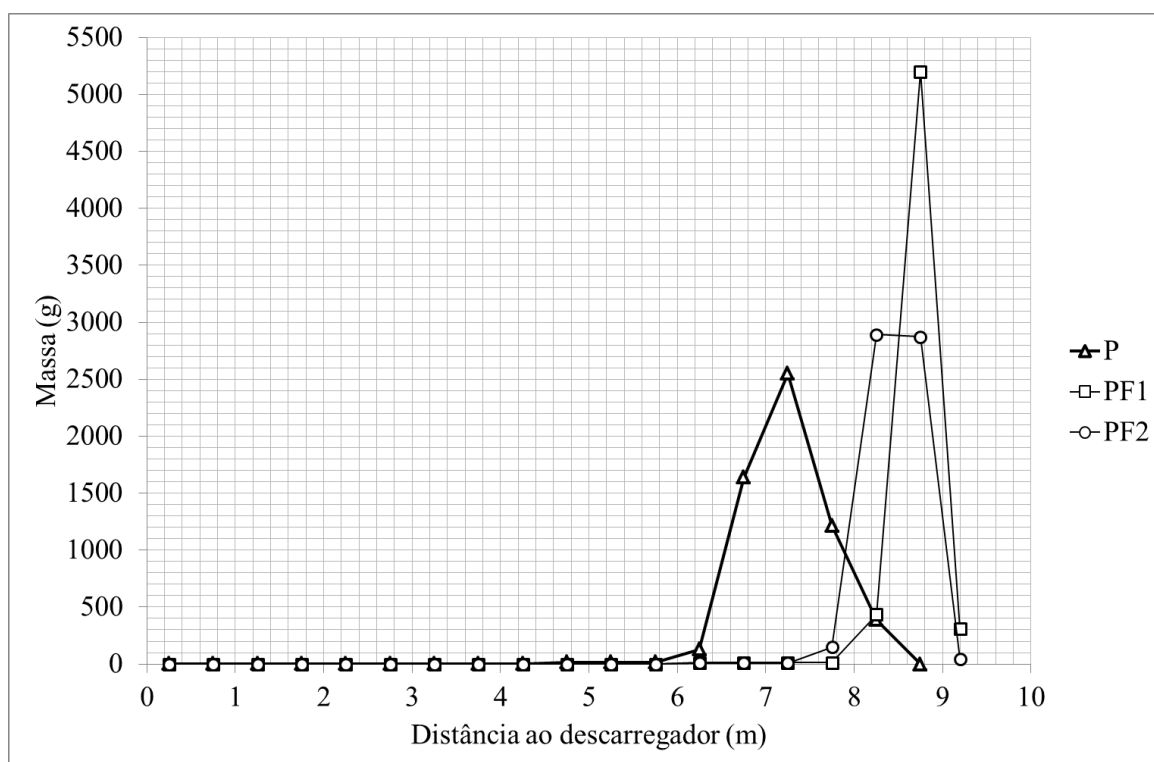


Figura 51. Distribuição das areias ao longo do canal, para as diferentes formas de albufeira ensaiadas.

O impacto da variação das formas da albufeira, no perfil longitudinal dos sedimentos é exposto na Figura 51. Em ambas as experiências, a grande maioria das partículas está depositada a montante do ensaio padrão, entre o trecho T16 e o trecho T19. A distribuição das areias depositadas não é idêntica nos dois ensaios, já que o PF1 manifesta um maior pico de sedimentação no trecho T18, superior a 5000 gramas. No ensaio PF2, denota-se um ligeiro

adiantamento do corpo de sedimentação e o pico de deposição é distribuído entre o trecho T17 e T18, apresentando valores a rondar o 2800 gramas em ambos.

Relativamente à dinâmica de transporte e deposição de areias, o ensaio PF1 (Figura 52a) mostrou-se muito semelhante ao ensaio PI0.25, à excepção de um aumento ligeiro na extensão de deposição e na formação dunar. No ensaio PF2, a distribuição dos sedimentos tornou-se mais parecida ao ensaio padrão, com a formação de duas frentes de deposição e do cume de erosão na parte posterior do corpo de depósitos. Novamente, observou-se uma taxa de erosão, e transporte superior do lado direito do canal, conforme se visualiza na Figura 52b.

A menor capacidade do reservatório, resultante da redução da secção transversal imediatamente a montante da barragem, provocou uma subida no nível de água com consequente deslocação da posição do ressalto hidráulico para fora dos limites do canal. A inexistência de ressalto hidráulico, e o aumento da altura de escoamento, condicionaram a respectiva velocidade. Assim sendo, a capacidade de transporte reduziu-se notavelmente, depositando a generalidade das areias em regiões a montante do ensaio padrão.



a) Forma PF1 da albufeira



b) Forma PF2 da albufeira

Figura 52. Formação dos depósitos após a realização dos ensaios de variação das formas da albufeira. Vista de jusante para montante.

5.2.6. Modo de descarga de sedimentos

Como foi descrito na secção 5.1.1, no ensaio padrão as areias eram descarregadas no escoamento junto às paredes laterais do canal. Para proceder à avaliação do impacto da alteração do modo de descarga, efectuou-se a descarga ao centro, da forma sugerida pela Figura 53.

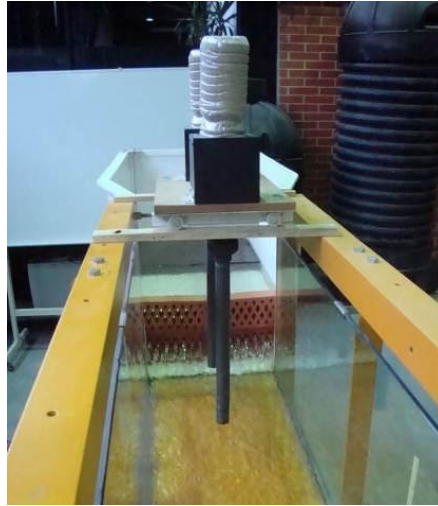


Figura 53. Disposição do mecanismo, para descarga de areias no centro.

O comportamento do escoamento líquido ao longo do ensaio PC foi exactamente igual ao do ensaio padrão, dado que as condições que o influenciam se mantiveram iguais. Após a abertura do mecanismo de descarga dos sedimentos, as areias acumularam-se de imediato na zona central do canal, formando um depósito parcialmente emerso. Rapidamente se deu início ao transporte gradual de toda a massa para jusante, com todos os processos de erosão, transporte e deposição a serem idênticos aos verificados no ensaio padrão. É de realçar que numa fase inicial, a concentração de depósitos era substancialmente superior na parte posterior, junto ao ressalto hidráulico, resultando na formação de um cume de altura superior ao formado no ensaio padrão.



Figura 54. Formação dos depósitos após a finalização do ensaio de variação do modo de descarga de areias. Vista de jusante para montante.

Estas diferenças dissiparam-se com o decorrer do ensaio e finalizado o mesmo, a distribuição das areias apresentou-se análoga à distribuição no ensaio padrão, tal como é possível averiguar na Figura 54.

Para uma melhor avaliação do impacto que o modo de descarga de sedimentos tem na distribuição dos sedimentos, o gráfico da Figura 55 apresenta a comparação do perfil de deposição deste ensaio, com o do ensaio padrão.

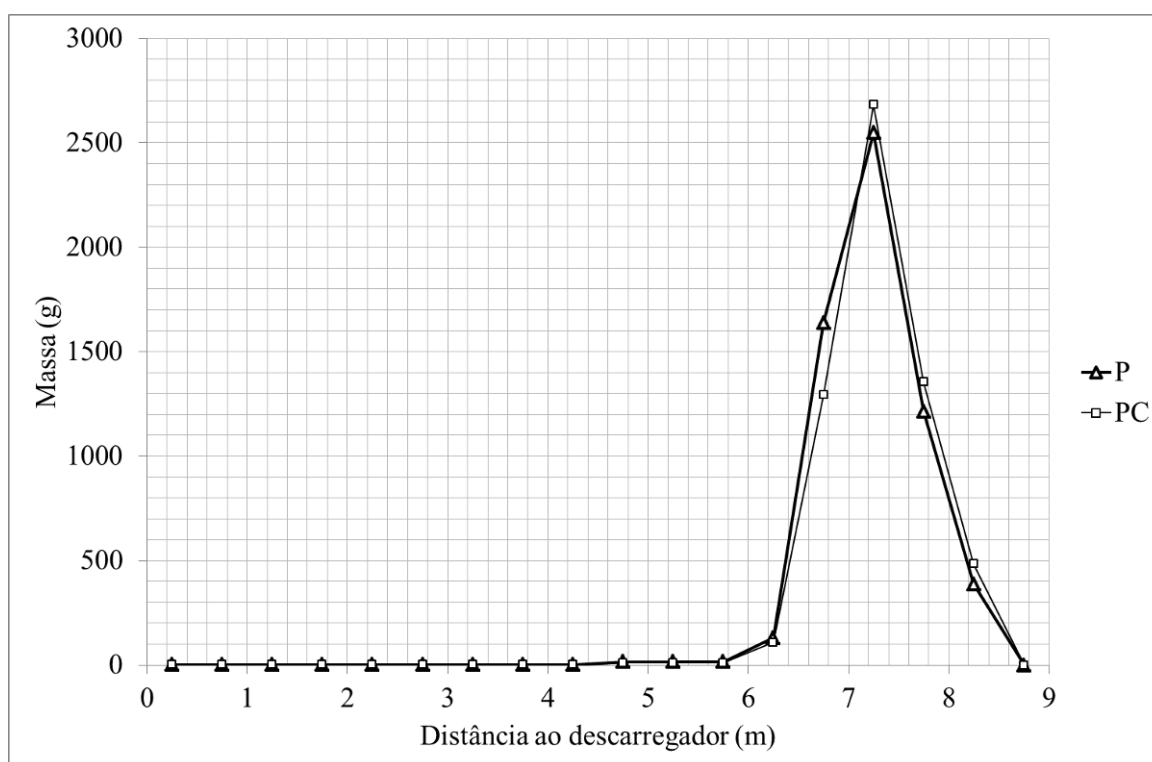


Figura 55. Distribuição das areias ao longo do canal, para os diferentes modos de descarga de sedimentos.

De uma forma geral, a distribuição longitudinal dos sedimentos apresentam configurações idênticas. Denota-se que até se atingir o trecho onde ocorre o pico de deposição, isto é, entre os trechos T15 e T17, o ensaio PC possui uma massa de areias superior ao ensaio padrão, da ordem dos 100 gramas por trecho. No trecho imediatamente a jusante do pico, o ensaio padrão apresenta cerca de 200 gramas de areias a mais, e nos trechos seguintes as diferenças são irrisórias. Os valores das massas depositadas por secção e da posição do centro de massa do aglomerado de sedimentos, encontram-se explícitos na Tabela 12, no Anexo III. O avanço do centro de massa foi de apenas 6 centímetros em relação ao registado no ensaio padrão.

Neste ensaio, os impactos na distribuição sedimentar foram mínimos, o que pode ser justificado com o facto da velocidade de escoamento e respectiva capacidade de transporte, permaneceram semelhantes às do ensaio padrão.

5.3. Ensaio das medidas de mitigação

No seguimento da sedimentação em escoamentos típicos de reservatório, surge a necessidade de controlo ou mitigação dos impactos que lhe são associados. Como já foi referido, a maioria das medidas existentes visa essencialmente preservar a capacidade de armazenamento do reservatório e como tal, a vida útil do mesmo. Destas medidas, fez-se uma selecção daquelas que seriam possíveis de reproduzir com as condições laboratoriais existentes, com especial atenção às que ambicionam também a passagem de sedimentos para jusante da barragem.

As medidas seleccionadas foram a lavagem com rebaixamento do nível de água, lavagem com esvaziamento do reservatório, sucção hidráulica de sedimentos e sifonagem de sedimentos.

5.3.1. Planeamento de ensaios

Todas as séries de ensaios realizados, à excepção das relativas à sifonagem, constituíram-se de duas fases distintas. A primeira fase foi comum a todos e caracterizou-se por uma repetição do ensaio padrão. Este factor é importante, pois o impacto da medida torna-se mais fácil de avaliar num ensaio com resultados previsíveis e previamente analisados.

Passados os 60 minutos do ensaio padrão, levou-se a cabo a execução da segunda fase do ensaio, correspondente à estratégia de remoção de sedimentos propriamente dita. Esta fase variou de uma série para a outra.

No âmbito da avaliação da eficácia da passagem de sedimentos para jusante por lavagem com rebaixamento do nível de água, executaram-se três ensaios, designados de LRP, LRPQ3.65 e LRPQ11.67, variando o caudal na 2ª fase do ensaio, após o rebaixamento, considerando um caudal menor, outro igual e outro maior do que o caudal inicial.

A técnica de passagem de sedimentos para jusante com recurso a lavagem com esvaziamento, avaliou-se também através de três ensaios, LEP, LEPQ3.65 e LEPQ11.67, igualmente com variação do caudal na 2ª fase.

Na sucção hidráulica, a segunda fase constitui-se de um total de seis ensaios, com a sucção a ser realizada através de uma mangueira, com 15 e 19 mm de diâmetro, repetindo os ensaios por três vezes para cada diâmetro, D1Ø15P, D2Ø15P, D3Ø15P, D1Ø19P, D2Ø19P e D3Ø19P.

Por fim, no caso da técnica de remoção de sedimentos da albufeira, por sifonagem, realizaram-se dois ensaios por diâmetro de mangueira, S1Ø15P e S2Ø15P, e S1Ø19P e S2Ø19P.

5.3.2. Lavagem com rebaixamento

No processo de lavagem dos sedimentos, utilizou-se um caudal líquido diferente para cada ensaio, denominado caudal de lavagem. O ensaio LRP foi executado com um caudal igual ao da primeira fase, enquanto nos outros dois casos, LRPQ3.65 e LRPQ11.67, ensaiaram-se caudais de 3.65 l/s e 11.67 l/s, respectivamente.

Após uma hora de ensaio padrão, para proceder à lavagem foi necessário o rebaixamento do nível de água no reservatório, alcançado através da abertura do descarregador de fundo da barragem instalada no sistema (Figura 30), aumentando a respectiva capacidade de vazão. O canal foi mantido nestas condições durante 10 minutos.

A abertura do descarregador de fundo provocou um aumento da vazão, o que por sua vez induziu uma redução na altura do escoamento em regime lento. Esta redução da altura da coluna de água despoletou a dissipação do ressalto hidráulico, na procura de um novo equilíbrio. A distância da barragem ao novo ressalto hidráulico formado foi proporcional ao aumento do caudal de lavagem. A erosão e transporte dos depósitos evoluíram de montante para jusante, à medida que no escoamento se dava a transição de regime lento para regime rápido.

O padrão de distribuição dos sedimentos (Figura 56) no ensaio LRP e LRPQ3.65 foi semelhante à ocorrida para os ensaios com caudal inferior ao padrão, revelando erosão mais intensa ao centro e a formação de uma frente de deposição única. No caso do ensaio LRPQ11.67 a distribuição dos sedimentos no canal, como se pode confirmar na Figura 56c, adoptou configurações semelhantes à padrão.

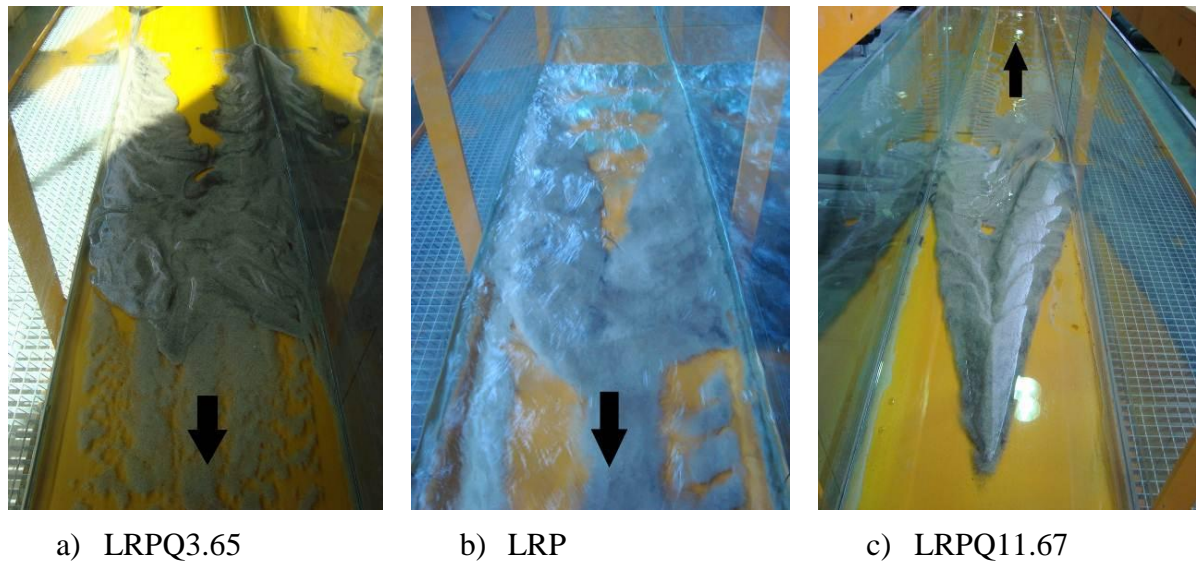


Figura 56. Formação de depósitos após a realização dos ensaios de lavagem com rebaixamento. A seta indica a direcção do escoamento.

Na Figura 57, está representada a distribuição de areias presentes no canal, após a aplicação da metodologia de ensaio acima referida. As massas de areia por trecho encontram-se representadas no Anexo IV (Tabela 13).

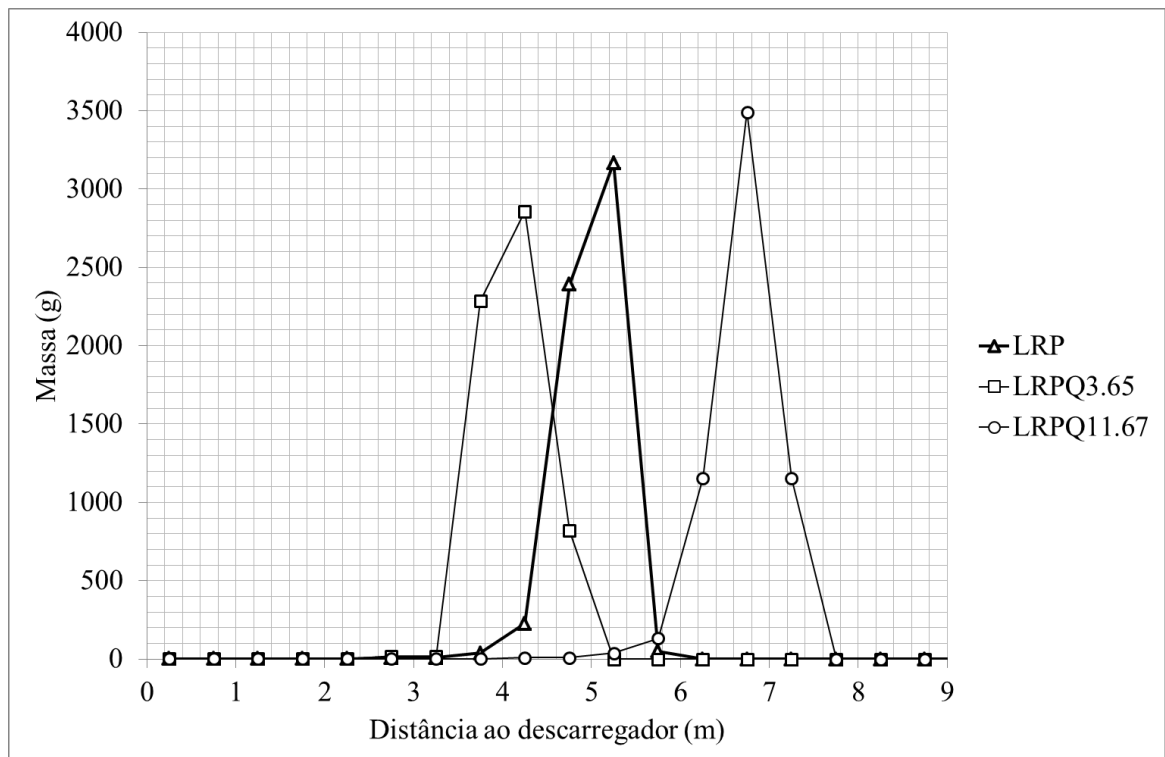


Figura 57. Distribuição das areias ao longo do canal, para os diferentes ensaios de lavagem com rebaixamento.

Examinando o gráfico é possível constatar o aumento progressivo da proximidade à barragem dos depósitos, com a diminuição do caudal de lavagem ensaiado. Este avanço pode ser confirmado pela localização do centro de gravidade dos sedimentos em cada ensaio (Tabela 13). O desfasamento máximo do centro de gravidade atinge cerca de 2.60 metros entre o ensaio LRP3.65 e LRP11.67. Todavia, o avanço mais expressivo observado é de 1.70 metros do ensaio LRP11.67 para o LPR.

Relativamente à distribuição dos depósitos, ocorre um decréscimo no pico de sedimentação, de aproximadamente 300 gramas, com a diminuição do caudal de lavagem. Os sedimentos estão distribuídos de forma mais uniforme no ensaio LRP3.65, ocupando mais trechos do canal. Nos dois ensaios restantes, os depósitos estão concentrados na sua maioria em três trechos do canal.

A abertura do descarregador de fundo, com estabilização do ressalto hidráulico em zonas mais próximas da barragem, resultou num aumento da extensão de canal a funcionar em regime de escoamento rápido, apresentando maiores velocidades e capacidades de transporte sólido. Este comportamento esteve na base da realocação da globalidade dos sedimentos, em zonas mais a montante da sua posição na primeira fase do ensaio. Quanto mais a jusante se formou esse novo ressalto, mais a jusante se localizaram os sedimentos.

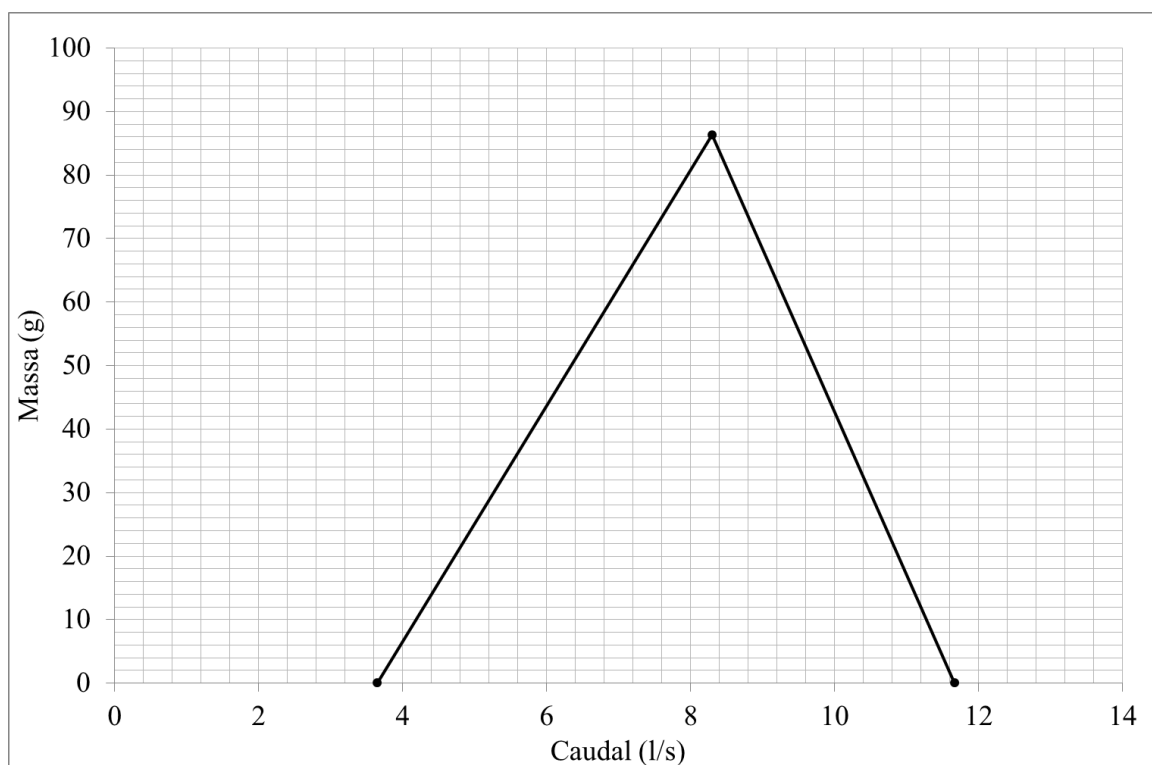


Figura 58. Areia passada para jusante da barragem, para os diferentes caudais de lavagem com rebaixamento.

Dado que o objectivo específico desta medida era a passagem de sedimentos para jusante, a 0 apresenta o gráfico de medição da quantidade de areias passadas.

Observa-se que apenas o caudal de lavagem de 8.30 l/s conseguiu proporcionar a passagem de sedimentos. Porém, apenas 86.31 gramas foram passados para jusante, representando uns escassos 1.44% da massa total de areias introduzidas no sistema (Figura 58).

No interior do reservatório, o decréscimo na altura de escoamento, com respectivo aumento da velocidade, não foram suficientes para, no espaço de tempo de execução do ensaio, transpor os sedimentos para além da barragem, à excepção dos sedimentos mais finos, no ensaio LRP.

5.3.3. Lavagem com esvaziamento

A metodologia levada a cabo na segunda fase dos ensaios desta série foi semelhante à anterior, usando-se os mesmos tempos de execução e os mesmos caudais de lavagem. Contudo, nestes ensaios o objectivo era o esvaziamento do reservatório, logo a abertura do descarregador de fundo por si só não seria suficiente. Para tal, procedeu-se à abertura de toda a barragem, como ilustra o esquema da Figura 59.

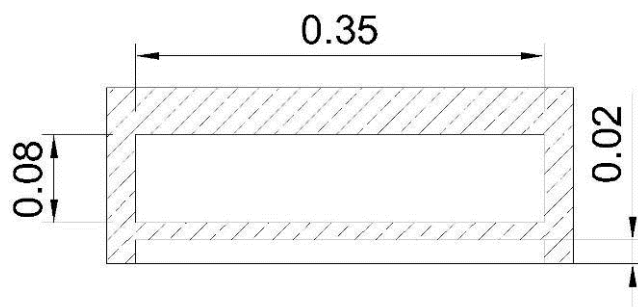


Figura 59. Esquema do funcionamento da barragem nos ensaios de lavagem com esvaziamento.

A primeira fase do ensaio decorreu nas condições padrão, durante uma hora. Depois, com a barragem completamente aberta, o ensaio decorreu durante mais 10 minutos. No momento de abertura da barragem, o aumento repentino da capacidade de vazão desta, induziu um rápido decréscimo na altura do nível de água no reservatório, resultando num desvanecimento do ressalto hidráulico. Praticamente todo o canal passou a funcionar em regime rápido. Visto que a descida do nível de água foi repentina, o transporte dos sedimentos iniciou-se para as areias localizadas a jusante da frente de deposição e a erosão evoluiu para

montante. Foi visível que, quanto menor o caudal de lavagem, mais lento foi o processo de transporte de sedimentos até à zona de formação do ressalto hidráulico. Esta observação deve-se à menor velocidade de escoamento, com consequente capacidade de transporte sólido mais baixa.

O novo ressalto hidráulico formou-se após toda a massa de areias estar já localizada na zona do escoamento com altura variável. As posições registadas para o ressalto foram 1.69, 0.89 e 0.62 metros a montante da barragem, para um caudal de lavagem de 3.65 l/s, 8.30 l/s e 11.67 l/s, respectivamente. Após os sedimentos entrarem na zona de altura variável do escoamento, o comportamento diferiu de ensaio para ensaio. Com vista a melhor avaliar esse comportamento, a Figura 60 expõe para cada caso, a distribuição da carga sólida depositada ao longo do canal.

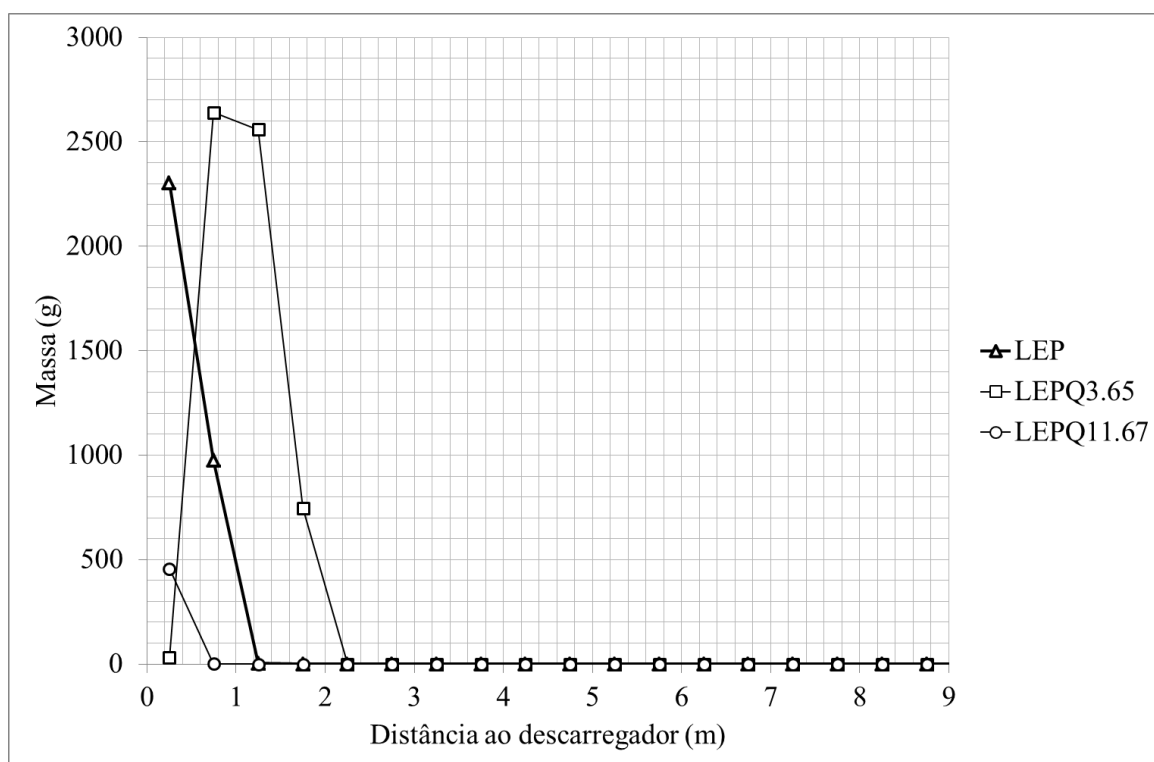


Figura 60. Distribuição das areias ao longo do canal, para os diferentes ensaios de lavagem com esvaziamento.

Nos ensaios LEP e LEPQ11.67, uma pequena parcela da carga sólida transpôs de imediato a barragem. Entretanto, as partículas que se iam depositando na zona de transição entre escoamento rápido e lento, eram gradualmente transportadas da frente de deposição para jusante da barragem. A erosão dos depósitos era substancialmente superior no centro do canal, deixando as zonas laterais com maior quantidade de areias depositadas (Figura 61). No ensaio LEPQ3.65, as areias depositadas na zona de transição, apresentaram uma mobilidade muito

baixa, não atingindo regiões próximas o suficiente para a passagem significativa de sedimentos para jusante. A configuração dos depósitos assemelhou-se à do ensaio anterior correspondente, LRPQ3.65.

Com o aumento do caudal, ocorreu um maior transporte de sedimentos para junto da barragem, o que é facilmente verificável na Tabela 13 do Anexo IV, pela comparação da localização do centro de gravidade das areias para os ensaios realizados. No caso do ensaio LEPQ11.67, apenas 457.2 gramas de areia permanecem nos limites do canal, imediatamente a montante da barragem. No ensaio LEP, essa parcela aumenta para mais de metade da massa total, cerca de 3300 gramas, estendendo-se ao longo do canal. No caso do ensaio LEPQ3.65, a porção de sedimentos que passa para jusante da barragem é residual. Contudo, é possível observar que a toda carga sólida depositou nos 2 metros adjacentes à barragem, com o pico de acumulação a ser dividido por dois trechos do canal, T2 e T3.

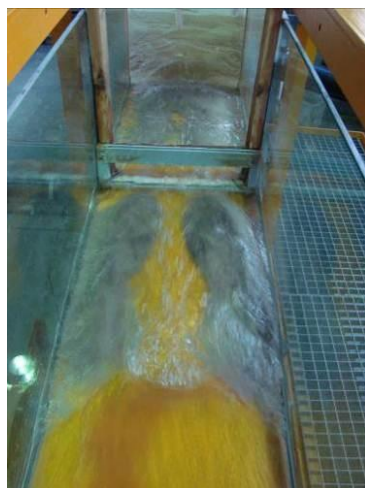


Figura 61. Formação dos depósitos no decorrer do ensaio LEPQ11.67. Vista de montante para jusante.

Para melhor perceber a influência do caudal de lavagem no sucesso desta técnica, a Figura 62 ilustra a massa de sedimentos evacuados com a variação do caudal escoado, na fase de esvaziamento.

Neste gráfico é bem perceptível que a quantidade de massa passada para jusante da barragem se vê dilatada com o aumento do caudal de lavagem ensaiado. Comparando os ensaios, a quantidade de areias escoadas no ensaio LEPQ3.65 é irrisória, ostentando uma diferença de quase 2700 gramas para o LEP e 5500 gramas para o LEPQ11.67.

Como verificado nos ensaios da técnica anterior, a localização do ressalto em posições próximas à barragem, aumentou a extensão de canal sujeita ao escoamento de maior velocidade e capacidade de mobilização de areias. Quanto maior a proximidade do ressalto

hidráulico à barragem, maior a quantidade de sedimentos depositados nas secções adjacentes à mesma.

À excepção do ensaio LEPQ3.65, a diminuição drástica na altura do escoamento em regime lento, combinada com a curta extensão de canal a funcionar neste regime, permitiu a geração de velocidades de escoamento suficientes para transportar sedimentos para jusante da barragem.

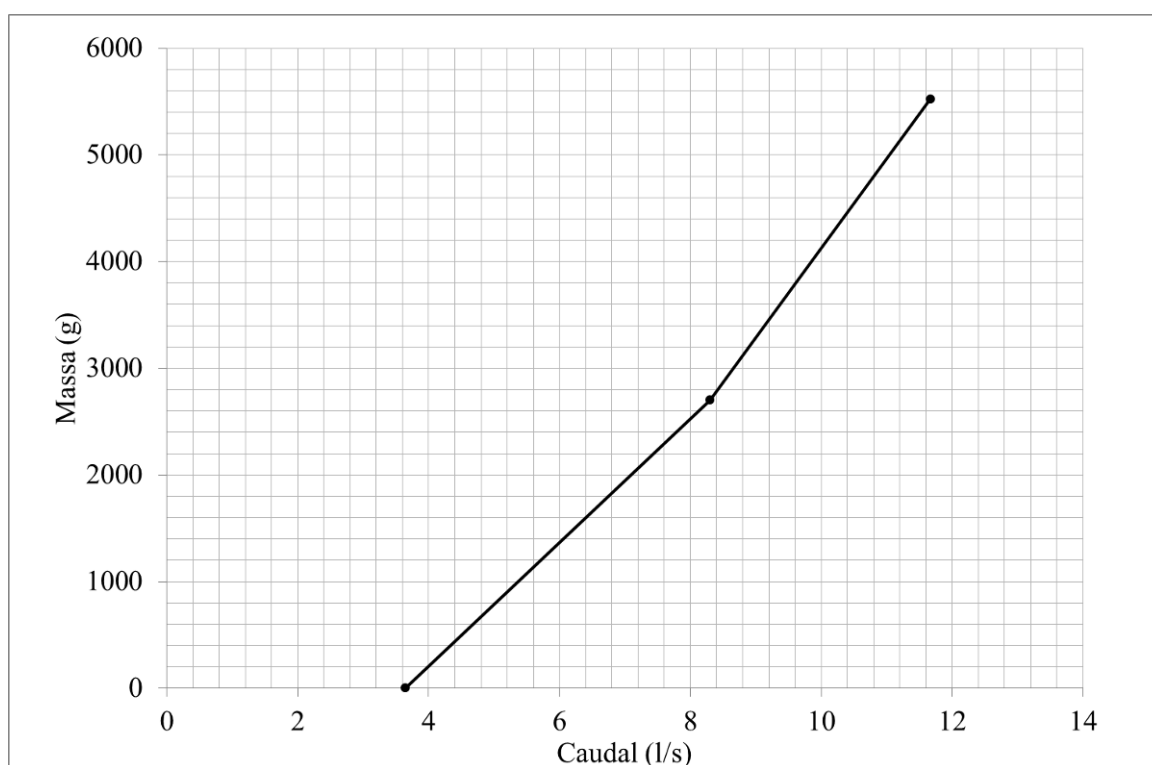


Figura 62. Areia passada para jusante da barragem, para os diferentes caudais de lavagem ensaiados.

5.3.4. Sucção hidráulica

Esta medida explorou as potencialidades da diferença de carga hidráulica de cerca de 1 metro, entre o leito do canal e um recipiente com capacidade para 20 litros, colocado junto ao canal. De maneira a encaminhar os sedimentos do canal para o recipiente, fez-se uso de um escoamento pressurizado em mangueiras, instaladas no sistema da forma representada na Figura 63. Foram ensaiados dois diâmetros interiores diferentes para as mangueiras, com 15 e 19 milímetros.

Para que se iniciasse um fluxo contínuo no interior da mangueira, criou-se sucção na extremidade de jusante. Seguidamente, a extremidade localizada no interior do canal foi colocada em contacto com as frentes de deposição formadas após os 60 minutos da primeira

fase do ensaio. O escoamento gerado pela diferença de carga hidráulica entre as extremidades da mangueira mobilizou areias para o seu interior, implicando a movimentação da extremidade da mangueira ao longo do corpo de sedimentação. A remoção por sucção dos sedimentos foi feita de jusante para montante do depósito sedimentar inicial.

Assim que o recipiente enchia por completo os 20 litros, a mangueira era retirada do canal, finalizando o ensaio.

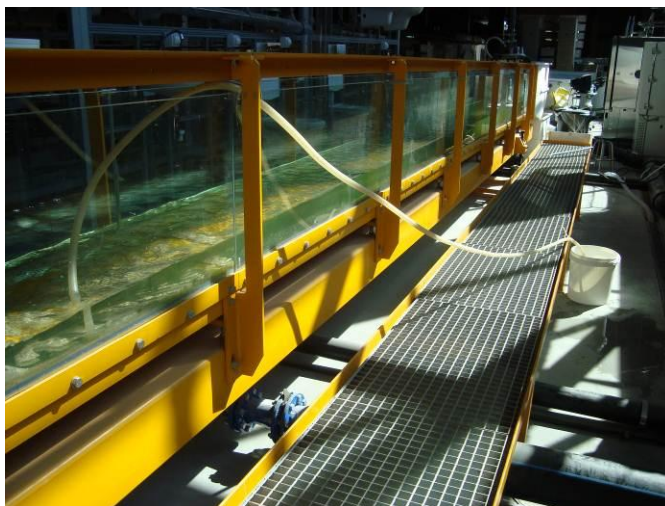


Figura 63. Mecanismo de extracção de areias por sucção.

Devido a alguma variabilidade na sucção dos sedimentos, para cada diâmetro de mangueira, foram realizados três ensaios, repetindo as mesmas condições. Em cada ensaio foi medido o tempo de enchimento do recipiente, de modo a permitir obter o caudal líquido e sólido. Estes valores encontram-se expostos nas Tabela 4 e Tabela 5, juntamente com as quantidades de areias medidas.

Tabela 4. Resultados dos ensaios de sucção hidráulica, com a mangueira de 15 mm de diâmetro.

	D1ø15P	D2ø15P	D3ø15P	Média
m_{retirada} (g)	2113.4	2472.8	2592.7	2393.0
m_{restante} (g)	3852.5	3457.4	3390.7	3566.9
$t_{\text{enchimento}}$ (s)	103.2	106.8	102.0	104.0
$Q_{\text{líquido}}$ (l/s)	0.19	0.19	0.20	0.19
$Q_{\text{sólido}}$ (g/s)	20.48	23.15	25.42	23.02

Nos ensaios com mangueira de diâmetro interior de 15 milímetros, verifica-se que a massa de areia retirada do canal varia numa gama de valores entre as 2100 e 2600 gramas, com a média de 2393 gramas. A carga sólida presente no escoamento pressurizado varia em

cerca de 5 g/s. Nesta série de ensaios a deposição ocorrida ao longo da mangueira não foi quantificável.

Tabela 5. Resultados dos ensaios de sucção hidráulica, com a mangueira de 19 mm de diâmetro.

	D1ø19P	D2ø19P	D3ø19P	Média
m_{retirada} (g)	3006.6	3067.9	3549.0	3207.8
m_{restante} (g)	2847.4	2846.1	2352.0	2681.8
$m_{\text{depositada}}$ (g)	108.8	78.0	91.2	92.7
$t_{\text{enchimento}}$ (s)	58.2	60.3	60.0	59.5
$Q_{\text{líquido}}$ (l/s)	0.34	0.33	0.33	0.34
$Q_{\text{sólido}}$ (g/s)	51.66	50.85	59.15	53.89

Com o aumento do diâmetro da mangueira, ocorreu um aumento da quantidade de areia retirada do canal, com uma média de 3207.8 gramas. Nos três ensaios realizados, registou-se deposição significativa no interior da mangueira ($m_{\text{depositada}}$) representando um valor médio de aproximadamente 1.5%, o que corresponde a valores a rondar os 90 gramas.

O caudal sólido escoado para o recipiente, nos dois primeiros ensaios rondou os 51 g/s, subindo aproximadamente 8 g/s no terceiro.

Com o aumento da secção da mangueira, tanto o caudal líquido, como o sólido, aumentaram. O acréscimo do caudal sólido, está directamente relacionado com o aumento do caudal líquido, escoado no interior da mangueira. Este origina uma maior velocidade de escoamento, com maior capacidade de transporte sólido.

5.3.5. Sifonagem

À imagem da série de ensaios descrita anteriormente, também esta série explorou o potencial hidráulico da diferença de carga, neste caso, entre a zona de acumulação de sedimentos e um recipiente colocado no depósito a jusante da barragem, como demonstra a Figura 64a. O desnível medido entre as duas zonas foi de aproximadamente 30 centímetros.

A canalização dos sedimentos foi realizada por uma mangueira com desenvolvimento ao longo do canal, cujas extremidades se localizavam na zona de deposição de areias e no interior do recipiente, a jusante da barragem. A passagem da mangueira para jusante da barragem, foi realizada por um dos orifícios de tomada de água (Figura 64b).



a) Recipiente instalado no reservatório de jusante

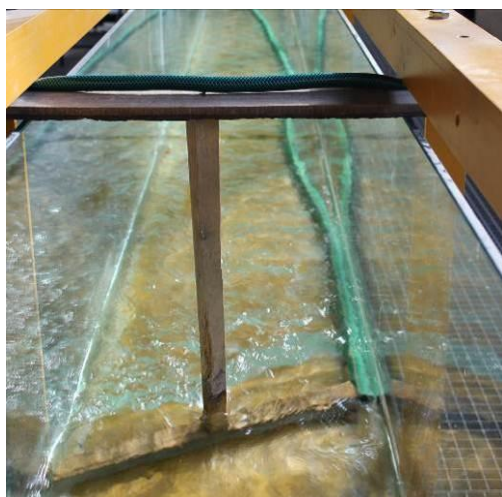


b) Passagem da mangueira para jusante da barragem

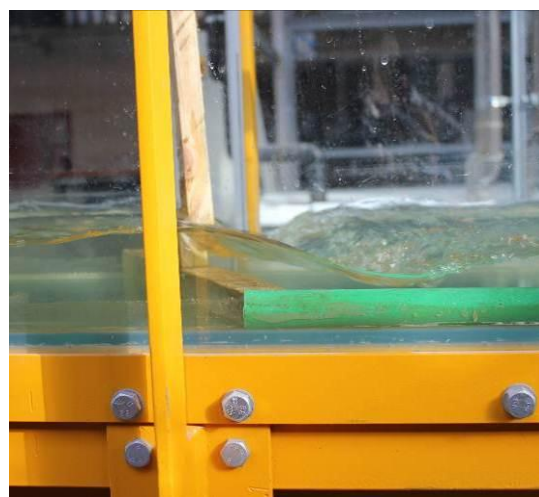
Figura 64. Pormenores da montagem do mecanismo de extracção de sedimentos por sifonagem

A cerca de 7.5 metros a montante da barragem, foi instalada uma barreira submersa, com 2.5 centímetros de altura, para promover a acumulação mais prolongada dos sedimentos nessa zona. Na Figura 65a, está representada a barreira e o mecanismo usado para a sua fixação. Na mesma imagem é possível a observação do local de instalação da extremidade de montante da mangueira para recolha de sedimentos.

Testaram-se dois diâmetros interiores distintos das mangueiras, de 15 e 19 milímetros. A série dividiu-se em 2 ensaios por diâmetro. Para cada ensaio, as condições de escoamento foram análogas às do ensaio padrão.



a) Barreira e mecanismo de fixação



b) Ressalto hidráulico formado a jusante da barreira

Figura 65. Pormenor da barreira instalada no canal, para realização dos ensaios de sifonagem.

O escoamento líquido, com a presença da barreira submersa sofreu fortes alterações, a começar pelo ressalto hidráulico que estabilizou a 1.55 metros a montante desta barreira, perfazendo um total de 9.05 metros da barragem principal. Na zona adjacente à barreira, a jusante, como mostra a Figura 65b, ocorreu a formação de um ressalto hidráulico.

Após o início dos ensaios, os primeiros sedimentos a atingir a barreira instalada no canal, depositaram-se na sua maioria nas imediações da mesma, verificando-se que uma parcela muito pequena era transportada para jusante, sobre a barreira. À medida que os sedimentos foram avançando e depositando imediatamente a montante da barreira, esta começou a mostrar-se ineficaz na retenção da maioria da carga sólida, com a transposição de sedimentos a ocorrer sobre a barreira (Figura 66). Contudo, verificou-se que parte das partículas eram encaminhadas para o escoamento pressurizado no interior da mangueira.

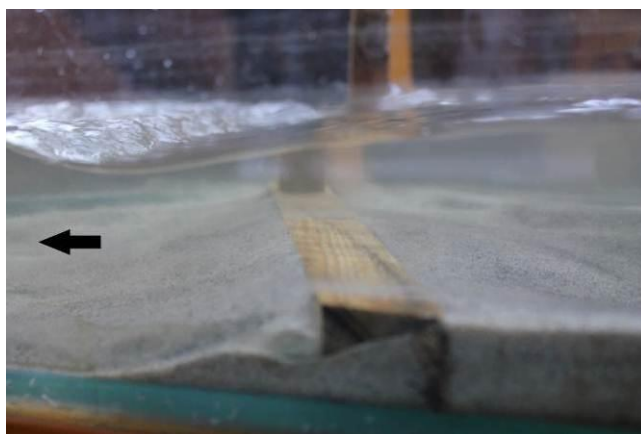


Figura 66. Acumulação de sedimentos e passagem sobre a barreira instalada no canal.

Os resultados medidos das massas de areia encontram-se explícitos na Tabela 6 e na Tabela 7, para a mangueira de 15 e 19 milímetros, respectivamente.

Tabela 6. Resultados dos ensaios de sifonagem, com a mangueira de 15mm de diâmetro.

	S1ø15	S2ø15	Média
$m_{\text{retirada}} \text{ (g)}$	34.0	11.5	22,8
$m_{\text{restante}} \text{ (g)}$	5352.2	5193.1	5272,7
$m_{\text{depositada}} \text{ (g)}$	592.5	776.5	684,5

No primeiro ensaio, com a mangueira de 15 milímetros de diâmetro, apenas 34 gramas de sedimentos foram conduzidas até ao recipiente colocado a jusante. Esta massa representa 0.6% da massa total de sedimentos, que é cerca do dobro das perdas associadas aos ensaios. Este valor ainda se viu mais diminuído no segundo ensaio, com a quantidade de sedimentos passados a ficar abaixo das perdas típicas de cada ensaio.

Ao longo do comprimento da mangueira, verificou-se uma forte deposição, que com o tempo acabou por bloquear toda a secção transversal, fazendo cessar o escoamento líquido no seu interior. No primeiro ensaio o valor foi menos expressivo, com quase 10% da massa total a depositar-se, enquanto no segundo ensaio atingiu os 12.9%, que traduz uma massa de 776.5 gramas.

Tabela 7. Resultados dos ensaios de sifonagem, com a mangueira de 19 mm de diâmetro.

	S1ø19	S2ø19	Média
m_{retirada} (g)	108.0	55.0	81,5
m_{restante} (g)	4659.0	4984.7	4821,9
$m_{\text{depositada}}$ (g)	1225.1	953.8	1089,5

O aumento do diâmetro da mangueira resultou em maiores quantidades de massa transportadas até ao recipiente. No entanto, essas quantidades não foram além de 108 gramas no primeiro ensaio e de 55 gramas no segundo ensaio.

A quantidade de deposição no interior da mangueira também aumentou com o diâmetro da mangueira, medindo-se valores a rondar os 1200 gramas para o primeiro ensaio, com uma redução no segundo para valores ligeiramente inferiores às 1000 gramas.

As pequenas quantidades registadas em todos os ensaios realizados para esta medida, são resultado do pequeno potencial hidráulico da diferença de carga entre as extremidades da mangueira. Esta diferença de carga não foi suficiente para a geração de um escoamento com velocidade e capacidade de transporte sólido suficiente, depositando a maioria dos sedimentos nele presentes, até obstruir por completo a secção transversal.

6. DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Nesta secção serão apresentados três casos de estudo que vão ao encontro dos temas avaliados em laboratório no âmbito do presente documento. É realizada uma análise crítica dos resultados obtidos laboratorialmente e uma comparação destes, com os casos de estudo.

6.1. Comentários e conclusões

6.1.1. Ensaios de transporte e deposição sedimentar

Para que ocorra transporte sólido num escoamento líquido, é necessário que este apresente capacidade suficiente para mobilizar as partículas. Quanto maior a velocidade de escoamento, para uma mesma secção transversal, maior a respectiva capacidade de transporte. Na globalidade dos ensaios, o escoamento líquido observado, por influência da barragem a jusante, apresentou dois trechos com características distintas, separados por um ressalto hidráulico.

O escoamento em regime rápido, localizado a montante do ressalto hidráulico, apresentou uma altura de escoamento constante em toda a sua extensão. Assim sendo, a velocidade e consequente capacidade de transporte sólido do escoamento foram constantes, com a última a ser suficientemente elevada para transportar toda a carga sólida afluyente.

O escoamento no interior da albufeira, em regime lento, apresentou uma altura crescente em direcção a jusante, originando um decréscimo gradual da velocidade do escoamento. A redução repentina da velocidade de escoamento, consequência da subida do nível de água à entrada do reservatório, está na base da deposição verificada nesta zona. Todavia, com o aumento do tempo de ensaio, o facto de a velocidade não cessar por completo resultou num contínuo transporte e deposição, originando a progressão dos depósitos para jusante, a um ritmo gradualmente mais lento.

Relativamente à carga sólida afluyente, o comportamento no escoamento não é semelhante na sua generalidade. Ainda que a areia ensaiada fosse uma areia bem graduada, as partículas mais finas nela presente, foram as primeiras a ser transportadas por uma espécie de corrente turva, que invadiu o reservatório, depositando em zonas mais a jusante que a maioria dos sedimentos. Estas partículas requerem uma menor capacidade de transporte para se mobilizarem. Consequentemente, no escoamento em regime lento, as partículas mais finas

apresentaram um alcance de deposição superior às partículas mais grosseiras, que depositaram à entrada do reservatório, sendo posteriormente transportadas.

A sequência de transporte e deposição dos sedimentos, a partir da inserção destes no escoamento líquido, pode ser comparada com a sequência observada por Bellal *et al.* (2003) e descrita seguidamente no caso de estudo 3 (secção 6.4). No entanto, não existe qualquer termo de comparação entre as condições em que os ensaios foram executados.

A posição de estabilização do ressalto hidráulico mostrou-se essencial na localização das areias ao longo do canal, para os ensaios de caudais inferiores ao caudal padrão e para o ensaio de inclinação superior à inclinação padrão. Estes ensaios geraram posições do ressalto hidráulico a jusante do ponto de estabilização padrão. Logo, a formação principal de sedimentos, apresentou-se igualmente localizada mais a jusante da verificada no ensaio padrão, devido ao aumento da extensão de canal com escoamento em regime rápido, passível de transportar toda a carga sólida para a zona de transição, mesmo quando sujeito a caudais inferiores.

Nos ensaios de inclinação inferior à inclinação padrão, e nos ensaios de variação da forma da albufeira, a inexistência de ressalto hidráulico na dimensão do canal revelou-se condicionante, uma vez que as areias eram inseridas no escoamento, com este a funcionar em regime lento. Como foi referido anteriormente, neste tipo de escoamento, a velocidade de escoamento e respectiva capacidade de transporte eram reduzidas devido aos elevados níveis da superfície de água. Assim sendo, as areias eram transportados a um ritmo muito lento, mesmo a parcela mais fina, depositando a maioria a montante do local de deposição no ensaio padrão. Nestes casos, quanto menor a altura do escoamento no ponto mais a montante do canal, mais a jusante se depositaram os sedimentos, devido ao aumento da velocidade de escoamento.

No caso dos ensaios com caudal superior ao caudal padrão, em que o ressalto hidráulico estabilizou a montante da posição do ensaio padrão, este deixou de ser condicionante na localização dos depósitos. Contudo o aumento do caudal gerou deposição em zonas a jusante do ensaio padrão, tal como tinha sido verificado por Ferreira (2010), como discutido no caso de estudo 2 (secção 6.3). O caudal escoado passou então a ser preponderante, dado que, associadas a maiores caudais, estão superiores velocidades de escoamento e consequentes capacidades de transporte.

Tendo em conta o padrão de deposição das areias, dois tipos de formação foram verificados. Nos ensaios em que o ressalto hidráulico estabilizou na posição do ensaio padrão, ou a montante desta, formaram-se duas frentes de deposição, com uma zona de deposição

central. Nos ensaios em que o ressalto hidráulico se posicionou a jusante do ensaio padrão, apenas se formou uma frente de deposição, com acumulação de sedimentos nas zonas laterais do canal. Estas duas configurações distintas das frentes do corpo principal de deposição, estarão relacionadas com irregularidades no canal hidráulico, propícias a geração de velocidades de escoamento superiores em diferentes zonas da secção transversal do canal, ao longo do seu comprimento. As irregularidades poderão ser relacionadas com desnivelamentos do fundo do canal, variações da sua secção transversal, ou mesmo alterações na rugosidade do canal ao longo do seu comprimento.

Da análise efectuada a todos os ensaios decorre a constatação de que, à excepção da dimensão das areias e do modo de descarga das areias, todas as condições variadas produzem impactos substanciais, quer no padrão de distribuição de depósitos, quer no posicionamento dos mesmos ao longo do canal. Das condições testadas, a variação da inclinação apresenta-se como a mais influente na localização do centro de massa dos sedimentos, apresentando a localização mais próxima e mais distante da barragem, para as inclinações de 1.75% e 0.25%, respectivamente. A variação do d_{50} das partículas para mais do dobro, e o modo de alimentação de carga sólida, não produziram variações na dinâmica de deposição das areias.

Em última análise, nas circunstâncias de ensaio em questão, os parâmetros condicionantes no transporte e deposição sedimentar são a inclinação do leito, o caudal escoado e a forma da albufeira.

6.1.2. Ensaios das medidas de mitigação

Nos ensaios de lavagem de sedimentos, a realocação a jusante da posição do ressalto hidráulico, por aumento repentino da capacidade de vazão da barragem, esteve na base da aproximação dos sedimentos à barragem. Este acontecimento deu origem a um aumento da extensão de escoamento em regime rápido, com maior capacidade de erosão e transporte das partículas depositadas durante a primeira fase do ensaio. No caso específico da lavagem com esvaziamento, o objectivo da medida seria a criação de um escoamento em regime livre, isto é, com todo o canal a funcionar em regime rápido. Contudo, a existência de partes da barragem a obstruir o escoamento, originou a formação de um ressalto hidráulico a montante.

Relativamente à transposição de sedimentos para jusante da barragem, as lavagens com rebaixamento geraram resultados insignificantes, quando comparados com os resultados obtidos na lavagem com esvaziamento. É excepção a este caso a lavagem com esvaziamento,

com caudal de lavagem de 3.65 l/s, embora, os sedimentos se tenham posicionado mais próximos à barragem do que em qualquer caso da lavagem com rebaixamento.

A ineficácia no cumprimento do objectivo das lavagens com rebaixamento, foi igualmente comprovada por Ferreira (2010), no caso de estudo 2 (secção 6.3). O rebaixamento do nível de água por aumento da capacidade de vazão da barragem, resultou em ressaltos hidráulicos demasiadamente afastados da barragem e em escoamentos em regime lento com velocidades insuficientes para, no tempo de execução da medida, transportar sedimentos até às imediações da barragem.

As lavagens com esvaziamento, para os dois maiores caudais de lavagem, mostraram-se eficazes na passagem de sedimentos. O posicionamento do ressalto hidráulico próximo à barragem, em combinação com as velocidades de escoamento e respectiva capacidade de transporte, foram suficientes para, no tempo de execução da medida, transportar sedimentos até às imediações da barragem com posterior lavagem para jusante. No caso da medida levada a cabo com o menor caudal de lavagem, o transporte das areias até à barragem não foi bem sucedido, devido ao aumento do tempo necessário para a erosão e transporte entre a localização dos sedimentos na primeira fase, e a zona de formação do ressalto na segunda fase do ensaio. Associado a este facto, a reduzida capacidade de transporte devido à baixa velocidade do escoamento, a jusante do ressalto hidráulico, não foi suficiente para executar com sucesso o transporte de sedimentos até à barragem.

Em suma, nas técnicas de lavagem de sedimentos executadas em laboratório, as principais condicionantes são, o tipo de operação da barragem, o caudal escoado e o tempo de execução da medida.

Nos ensaios das técnicas de sucção hidráulica e sifonagem, a diferença de carga foi uma condição primordial na geração de escoamento líquido no interior da mangueira. O escoamento sob pressão gerado no interior da mangueira foi suficiente para criar um fenómeno de sucção na extremidade montante, capaz de mobilizar as areias para o seu interior.

No caso da primeira técnica, o aumento do diâmetro da mangueira, induziu um aumento do caudal escoado no interior da mesma, o que se traduz num aumento da velocidade de escoamento e consequentemente a capacidade de transporte. Com efeito, o caudal sólido no interior da mangueira manifestou-se superior com o aumento da secção de escoamento, resultando numa maior quantidade de sedimentos, retirados do escoamento. É essencial referir que, o aumento da secção de escoamento também induziu deposição ao longo da mangueira, o que indica que a capacidade de transporte se foi reduzindo ao longo do escoamento no interior

da mangueira. Existiu alguma incerteza associada a esta técnica, dado que foi dependente da movimentação manual da extremidade da mangueira ao longo dos depósitos.

Com base na análise dos ensaios realizados, a remoção de sedimentos por sucção hidráulica, depende essencialmente da diferença de carga entre as extremidades da mangueira, do diâmetro da secção da mangueira e da constante movimentação da extremidade de jusante ao longo do corpo de deposição. A capacidade de armazenamento de água e areias, do recipiente, pode também ser considerada uma limitação da medida em causa.

Nos ensaios de sifonagem, as quantidades de areias retiradas, para ambos os diâmetros de mangueiras, foram insignificantes quando comparadas com a quantidade total de areias no escoamento. Este facto está relacionado com a deposição ocorrida ao longo da mangueira, obstruindo por completo a secção transversal. A deposição no desenvolvimento longitudinal da mangueira, ocorreu devido a reduzida capacidade de transporte sólido do escoamento, consequência da respectiva baixa velocidade. Na base deste acontecimento está a diferença de carga hidráulica, incapaz de gerar um escoamento sob pressão, com caudal líquido suficiente para transportar sedimentos de uma extremidade para a outra, e eventualmente, a perda de carga ao longo da mangueira, responsável pela diminuição da capacidade de transporte do sistema. Com o aumento da secção transversal da mangueira, o aumento de sedimentos escoados a jusante não foi significativo, o que permite concluir que o aumento da secção não foi suficiente para a criação de um caudal com velocidades de escoamento e capacidade de transporte sólido suficientes para evitar a deposição na mangueira.

A diferença de carga hidráulica e o diâmetro da mangueira, são parâmetros claramente condicionantes da sifonagem nas condições dos ensaios realizados. A localização dos sedimentos, e a respectiva extremidade da mangueira também deverão ser tidos em conta, uma vez que menores comprimentos, acarretam menores perdas de carga ao longo do percurso. Na secção 4.2.2.2, já se havia referenciado que nestas medidas, aplicadas em situações reais, a sua eficiência depende igualmente dos parâmetros mencionados para o caso laboratorial.

De todas as técnicas ensaiadas, a que se mostrou mais eficaz na remoção de sedimentos do reservatório, foi a lavagem com esvaziamento. A referida técnica foi também a única a passar sedimentos em quantidades expressivas para jusante da barragem, ao contrário da sucção hidráulica que, embora eficaz na remoção de grandes quantidades de sedimentos, necessitou de local de armazenamento de sedimentos e água.

6.2. Caso de estudo 1

O primeiro caso de estudo que aqui se refere é um trabalho laboratorial realizado no canal hidráulico do laboratório do DECivil, descrito previamente neste capítulo. Neste trabalho, detalhado em Ribeiro (2009) e sumarizado em Coelho *et al.* (2009), foram utilizados dois tamanhos distintos de sedimentos, com $d_{50} = 0.51$ mm e $d_{50} = 2.18$ mm, ambos calibrados com recurso a peneiração. Foi considerada uma bacia de sedimentos, para simulação das condições naturais de fundo de um rio, com 80 cm de comprimento e 2 cm de profundidade. O teste considerou ainda três inclinações diferentes do canal, de 0.5%, 1.0% e 1.5% e dez caudais diferentes, variando entre valores pequenos, perto das condições iniciais de transporte de sedimentos, até valores que resultam num caudal sólido significativo.

Nesse trabalho foram executados testes, na ausência de barreiras, de modo a conhecer os volumes de transporte em condições naturais. Verificou-se que com o aumento da inclinação ocorria um aumento do transporte sedimentar para ambos os tamanhos de sedimentos, embora esse aumento fosse mais expressivo quando considerados os sedimentos mais finos.

Depois, os ensaios na presença de descarregadores foram executados através da instalação de uma barreira realizada por uma lâmina de acrílico com crista em bixel, localizada 60 cm a jusante da bacia de sedimentos. Duas alturas distintas da barreira foram utilizadas, nomeadamente 10 cm e 25 cm.

Todas as condições, inclusive as dimensões de sedimentos, foram novamente testadas, mas não ocorreu registo de qualquer tipo de transporte sedimentar. Na Tabela 8 encontra-se representada a redução média da velocidade do escoamento após a introdução das barreiras, de acordo com as inclinações do canal e alturas das barreiras.

Tabela 8. Redução média das velocidades de escoamento (Coelho *et al.*, 2009).

Altura do descarregador (cm)	i (%)	Redução da velocidade de escoamento (%)
25	0.5	88
	1.0	92
	1.5	93
10	0.5	77
	1.0	84
	1.5	87

A análise da distribuição da capacidade de transporte sedimentar a montante do descarregador, revelou uma redução significativa à entrada da albufeira criada pelo

descarregador. O decréscimo da capacidade de transporte acentuou-se com o aumento da inclinação e dos caudais líquidos. Esta redução no transporte sedimentar foi consequência do aumento da altura de escoamento, com consequente redução da velocidade de escoamento.

6.3. Caso de estudo 2

À semelhança do caso de estudo anterior, os ensaios laboratoriais que constituem o caso de estudo 2 foram realizados no canal hidráulico do laboratório do DECivil. Nestes ensaios, descritos em Ferreira (2010), a barragem usada e o sistema de alimentação sólida foram os mesmos dos ensaios realizados no âmbito da presente dissertação.

A carga sólida foi composta por dois tipos de areias diferentes, uma recolhida do leito do rio Vouga, a montante da barragem da Cercosa e a outra existente no DECivil, ambas com $d_{50} = 0.30$ mm. Foi utilizada uma inclinação do canal fixa de 1.25% e um caudal inicial de 8.4 l/s, que poderia variar até um máximo de 20.4 l/s

6.3.1. Transporte sólido com descarregador

Duas séries de ensaios foram executadas, tendo a primeira o objectivo de avaliar o transporte sedimentar numa albufeira e a segunda, a avaliação da formação do delta.

Na primeira série, variando apenas o tempo do ensaio e o caudal sólido afluente, foi possível concluir que, principalmente no ensaio de maior duração, quando apenas um dos lados da secção transversal do canal é alimentado com sedimentos, existe uma tendência à meandrização do escoamento, o que potencia o assoreamento da albufeira, nomeadamente a formação de praias aluviais. Após o corte do fornecimento de sedimentos e com a passagem do tempo ocorre a formação de um depósito de sedimentos em forma de delta, à entrada da albufeira.

Na segunda série de ensaios, o elemento variável foi o escoamento, mantendo todos os outros parâmetros constantes. Esta série permitiu concluir que a formação do delta faz com que a altura de água que existia antes da criação da albufeira seja reposta após a construção da mesma. Assim, a parte superior do delta caracteriza-se por ser aproximadamente paralela à superfície livre da água.

Outra das conclusões retiradas por Ferreira (2010) está no facto de o aumento do caudal líquido, resultar numa movimentação do centro de massa dos depósitos para jusante, na albufeira (Figura 67).

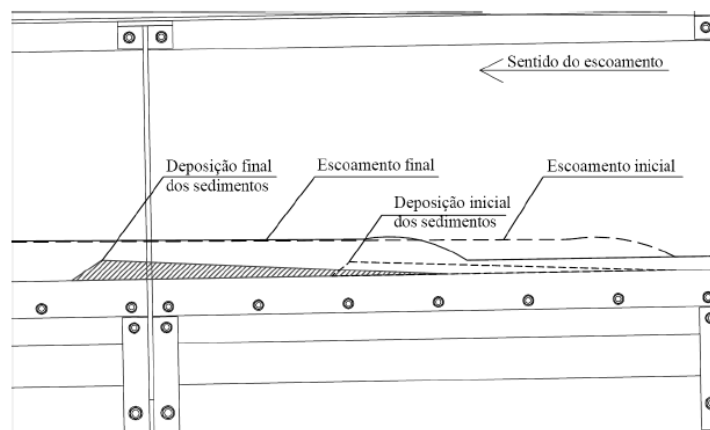


Figura 67. Esquema da movimentação do depósito de sedimentos durante o ensaio (Ferreira, 2010).

6.3.2. Transporte sólido quando sujeito a descarga de fundo

Os ensaios para perceber a movimentação dos sedimentos num reservatório quando sujeitos a descargas de fundo, foram executados e pormenorizados por Ferreira (2010) e consistiram em três fases cujas condições de escoamento, inclinação, tamanho dos sedimentos, método de alimentação de caudal sólido e forma do descarregador se mantiveram iguais às descritas nos ensaios anteriores do mesmo autor.

Numa primeira fase desta série de ensaios, realizou-se a descarga de sedimentos no canal com um caudal inicial de 8.4 l/s, verificando-se a formação do previsível delta. A segunda fase caracterizou-se pela redução substancial do caudal líquido até valores na ordem dos 0.5 l/s de forma a simular a época de seca e consequente abaixamento do nível de armazenamento do reservatório. Por fim, na terceira fase, procedeu-se à abertura do descarregador de fundo antes do aumento dos caudais, simulando a forma de funcionamento de uma barragem, após um período de seca, para eliminação de sedimentos depositados.

Várias conclusões foram obtidas destes ensaios laboratoriais, salientando-se a observação de partículas mais grosseiras em regiões próximas à barragem, e de partículas mais finas nas zonas a montante do depósito formado. Tal fenómeno é fundamentado pelo autor como consequência da formação de uma corrente de turbidez, que transportava a maior parte dos sedimentos finos e se dissipava assim que chegava ao ressalto hidráulico, ao passo que os sedimentos mais grosseiros eram transportados por arrastamento. Outro fenómeno observado foi a formação de uma ilha na zona do ressalto hidráulico, aquando da execução da segunda fase dos ensaios.

Os ensaios realizados por Ferreira (2010), permitiram ainda verificar que, efectivamente, com a abertura do descarregador de fundo, os sedimentos atingem regiões mais próximas à barragem, no entanto a percentagem de sedimentos que transpõem a mesma é insignificante quando comparada com a retida na albufeira.

6.4. Caso de estudo 3

O presente caso focou o seu objecto de estudo na evolução morfológica de sedimentos em canais de inclinação elevada, sob escoamento sobrecarregados e na presença de ressalto hidráulico criado pelo aumento repentino da altura de água a jusante. Foi descrito por Bellal *et al.* (2003) e levado a cabo na *Université Catholique de Louvain*, no canal de sedimentos do *Civil and Environmental Engineering Laboratory*. O mecanismo montado encontra-se ilustrado na Figura 68 e é composto pelo canal de inclinação variável, que se encontra ligado a um sistema de recirculação de água. A montante possui um sistema de alimentação de sedimentos e a jusante um tanque de deposição. Adicionalmente foi usada uma sonda, responsável pelo registo da evolução do leito e da altura do nível de água, e um sistema digital de imagem para registar a sequência do escoamento, através da parede envidraçada do canal.

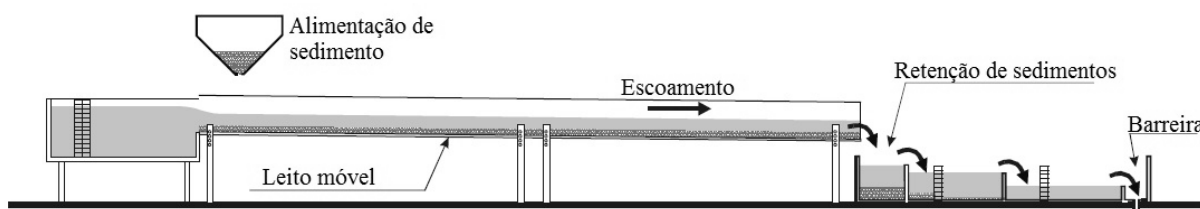


Figura 68. Esquema do sistema usado para os ensaios laboratoriais (Bellal *et al.*, 2003).

O canal possui 7.6 metros de comprimento, 0.5 metros de largura e o sistema de alimentação de sedimentos encontra-se localizado 70 centímetros a jusante da extremidade de montante. Os sedimentos usados eram areias grossas quase uniformes, com um diâmetro médio de 1.65 milímetros.

Várias experiências foram realizadas, segundo os parâmetros de escoamento resumidos na Tabela 9.

Tabela 9. Parâmetros gerais dos ensaios (Bellal *et al.*, 2003).

Série	i_0 (%)	Q (l/s)	Fr_0	Fr_{regime} lento	Fr_{regime} rápido	Q_s (l/s)	$H_{\text{água, jus.}}$
Série 1	3.55	11.5	1.92	0.13	1.14	0.196	20.86
Série 2	3.02	12	1.88	0.12	1.39	0.196	20.93
Série 3	2.74	15	2.47	0.13	1.27	0.196	22.63

Após a realização dos ensaios mencionados, os investigadores concluíram que a evolução da morfologia do leito ocorria segundo duas etapas distintas. Numa primeira fase, (Figura 69a) ocorreu a propagação de uma pequena frente de sedimentação em direcção a montante, aproximadamente à mesma velocidade que o ressalto hidráulico se deslocava igualmente para montante. Posteriormente, quando o ressalto hidráulico estabilizou, ocorreu a conversão desta pequena deposição num corpo ingreme de sedimentos, devido a sedimentos localizados nesta zona. Na segunda fase (Figura 69b), o corpo de sedimentos progrediu em direcção a jusante, associado a uma regressão gradual e decréscimo na intensidade do ressalto hidráulico. Seguidamente, o leito posicionou-se na zona de transição do regime rápido para o regime lento, numa espécie de ressalto hidráulico invertido.

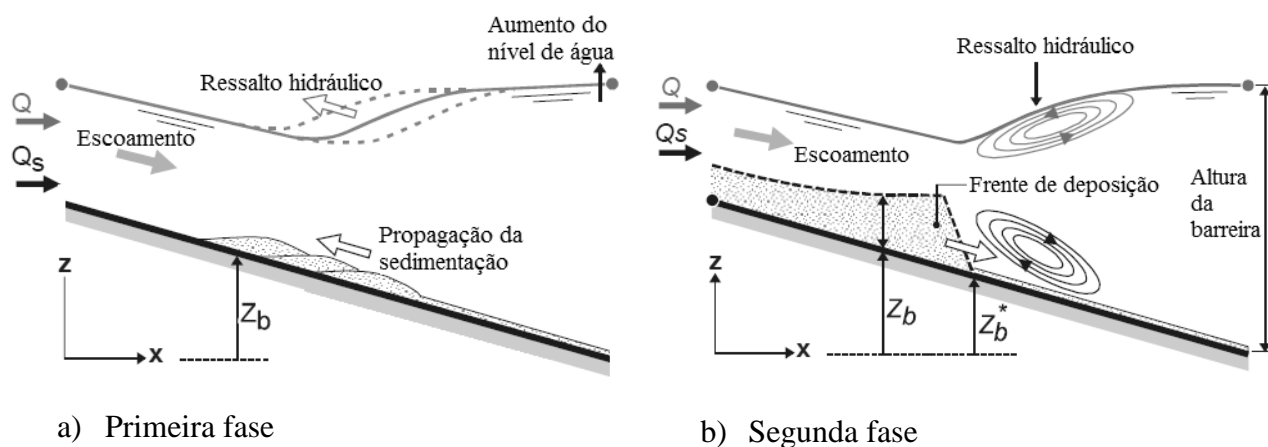


Figura 69. Esquema da reacção morfológica de um escoamento rápido a uma subida repentina do nível de água a jusante (Bellal *et al.*, 2003).

Estes resultados foram comparados com perfis modelados numericamente e considerações teóricas de investigadores qualificados, e no geral as comparações foram favoráveis.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

No capítulo que se segue, são expostas as principais conclusões a retirar de todo o documento, bem como os potenciais desenvolvimentos a realizar no futuro.

7.1. Conclusões

Na presente secção apresentam-se as principais ideias retiradas do trabalho desenvolvido, com o objectivo de contribuir para a compreensão da problemática do assoreamento de albufeiras e respectivas medidas de mitigação.

Neste trabalho começou-se por proceder à caracterização geral das barragens, discriminando as finalidades da sua construção, o tipo de funcionamento, a geometria da albufeira criada a montante e os impactos associados a estes empreendimentos. Construídas para fins diversos, sendo que os mais importantes são o abastecimento para regas, consumo doméstico e industrial, e a produção eléctrica, as barragens em Portugal podem ser distinguidas com base no tempo de enchimento, entre barragens a fio-de-água e barragens de regularização. Além da formação de uma albufeira a montante, que poderá ser classificada em quatro tipos de acordo com a variação da capacidade de armazenamento e o nível de água da mesma, as barragens geram impactos tanto a montante como a jusante desta. Salienta-se o impacto no equilíbrio sedimentológico do rio.

De modo a compreender melhor o impacto das barragens no equilíbrio sedimentar dos rios, no capítulo 3, abordou-se o comportamento do transporte de sedimentos no escoamento típico de reservatório. Concluiu-se que, para um mesmo caudal escoado, o aumento da secção de escoamento se traduz na redução ou eliminação da respectiva velocidade. Consequentemente ocorre uma diminuição da capacidade de transporte do escoamento, levando à deposição de sedimentos no leito do rio. Devido a uma vasta gama de variáveis, relacionadas acima de tudo com os sedimentos e as características da albufeira, a distribuição dos sedimentos não é homogénea ao longo do reservatório. Contudo, é possível estabelecer um padrão de deposição ao longo do leito do rio. Na parte mais a montante do rio, onde o efeito do ressalto hidráulico se faz sentir, inicia-se a deposição dos materiais mais grosseiros transportados por arrastamento, denominando-se depósitos de remanso. Este processo é

prolongado ao longo do leito, até ao momento em que a velocidade se encontra de tal forma reduzida que a totalidade das partículas grossas e uma parcela das finas se deposita, formando o delta. Esta formação é dividida em duas partes, *topset bed* e *foreset bed*, de acordo com a sua inclinação e dimensões dos sedimentos depositados. A jusante do delta, encontram-se os depósitos de fundo, constituídos por partículas de dimensões menos expressivas, transportadas em suspensão no escoamento, ou por correntes de densidade. Directamente ligados à deposição nas albufeiras, estão impactos no sistema fluvial, quer a montante, quer a jusante da barragem. De forma geral, os impactos mais evidentes ocorrem ao nível do equilíbrio dinâmico entre deposição e erosão ao longo do rio.

Com a consciencialização dos efeitos nefastos associados ao seccionamento dos cursos de água, surgiu o desenvolvimento de diversas técnicas de controlo e gestão de sedimentos presentes nos sistemas fluviais. As técnicas existentes agrupam-se em dois grupos distintos, nomeadamente, técnicas de redução de sedimentos afluentes ao reservatório e técnicas de mitigação da sedimentação nos limites do reservatório.

A gestão da bacia hidrográfica, retenção de sedimentos a montante, derivação de sedimentos e armazenamento fora do curso de água são as quatro medidas constituintes da redução de sedimentos afluentes às albufeiras. Este conjunto de medidas não apresenta qualquer tipo de redução do efeito dos problemas gerados a jusante das barragens.

As medidas de mitigação da sedimentação nos limites do reservatório podem ser efectuadas de forma a reduzir a deposição dos sedimentos no interior do reservatório, ou removendo os sedimentos previamente depositados no leito. Do primeiro caso, fazem parte as medidas de rebaixamento sazonal, rebaixamento com previsão do histograma, rebaixamento por curva padrão ou passagem de correntes de turbidez. A remoção dos sedimentos já depositados é atingida recorrendo-se a lavagem com rebaixamento do nível de água no reservatório, lavagem com esvaziamento do reservatório, sifonagem, dragagem, ou extracção a seco. As medidas referidas não só amortecem os impactos na vida útil do reservatório, como também ajudam a solucionar problemas verificados a jusante da barragem.

No decorrer dos ensaios realizados, detalhados no capítulo 5 e discutidos no capítulo 6, foram obtidos resultados satisfatórios e conclusivos, quer na avaliação do transporte e deposição sedimentar, quer na avaliação das medidas de mitigação.

No que ao transporte sólido diz respeito, a maioria da deposição ocorre imediatamente à entrada do reservatório, na zona de formação do ressalto hidráulico. As partículas de carácter

mais fino, depositam-se em zonas mais interiores do reservatório. O local de estabilização do ressalto hidráulico apresenta-se, portanto, crucial na localização da globalidade dos depósitos. Não obstante, verificou-se que as areias depositadas se vão movimentando para jusante, ao longo do tempo. Este fenómeno implica a progressão do centro de massa dos sedimentos em direcção à barragem, a uma velocidade decrescente com o tempo, até, eventualmente, a mobilidade dos sedimentos ser nula, em condições normais de escoamento.

Dos parâmetros testados, nos diversos ensaios de estudo do transporte e deposição sedimentar, apenas aqueles que alteram o comportamento do escoamento líquido, nomeadamente a posição do ressalto hidráulico, induziram alterações na posição do centro de massa das areias depositadas. Quando a posição do ressalto não é suficiente para definir a localização do centro de massa dos sedimentos, o caudal líquido escoado torna-se preponderante.

Sumarizando, a distribuição dos sedimentos ao longo de um curso de água, tendo e conta os resultados obtidos em laboratório, está directamente relacionada com a posição de formação do ressalto hidráulico, que por sua vez é influenciada pela inclinação do leito e forma da secção transversal da albufeira. O caudal escoado influencia directa e indirectamente a distribuição dos sedimentos, dependendo da posição do ressalto hidráulico.

Nos ensaios de mitigação da deposição de sedimentos, as medidas não apresentam eficácias iguais de remoção de sedimentos do sistema. Das quatro medidas ensaiadas, apenas a lavagem de sedimentos com esvaziamento e a sucção hidráulica, se mostram eficazes na remoção de areia, ao passo que a lavagem com rebaixamento e a sifonagem exibem quantidades irrisórias de partículas removidas.

Nas lavagens de sedimentos, a realocação do ressalto hidráulico com consequente aumento da extensão de escoamento em regime rápido, devido ao aumento da capacidade de vazão da barragem, é essencial para a erosão e transporte para jusante, das areias previamente depositadas a montante. Neste processo de erosão e transporte dos sedimentos previamente depositados, o caudal de lavagem é condicionante, pois quanto maior o caudal, maior a velocidade de escoamento e respectiva capacidade de transporte. A proximidade do ressalto hidráulico à barragem, deverá ser suficiente para que o escoamento em regime lento formado entre ambos, no tempo reservado para a aplicação da técnica, apresente velocidade suficiente por forma a dar continuação ao transporte dos sedimentos para jusante da barragem. Com efeito, entre as técnicas de lavagem testadas, aquela que produzem ressaltos hidráulicos mais

próximos da barragem, apresentam-se como as mais eficazes no cumprimento do objectivo visado.

Em suma, as condicionantes das técnicas de lavagem são, o modo de operação da barragem para aumento da capacidade de vazão, a posição do ressalto hidráulico devido ao aumento da vazão, o caudal de lavagem usado e o tempo de execução da técnica. Com efeito, as lavagens com esvaziamento, proporcionam as melhores condições para a passagem de sedimentos para jusante da barragem.

A técnica de sucção hidráulica, executada com recurso a um escoamento pressurizado gerado pela diferença de carga hidráulica entre a extremidade de montante e jusante da canalização, revelou-se a técnica mais eficaz de entre as técnicas ensaiadas. No entanto, esta técnica depende da movimentação da extremidade montante da canalização, pelas zonas de maior acumulação de sedimentos, e da existência de um local para armazenamento da mistura água/sedimentos.

Os resultados obtidos permitem concluir que o aumento da secção da canalização, é proporcional à remoção de areias. Contudo, existe o risco de deposição ao longo da canalização, por perda de capacidade de transporte do escoamento. Como tal, a diferença de carga hidráulica torna-se essencial para a geração de um escoamento pressurizado com velocidade suficiente para assegurar o transporte sólido ao longo da canalização.

A sifonagem segue o mesmo princípio de funcionamento da sucção hidráulica, com excepção da extremidade de montante da canalização ser fixa, e da evacuação de sedimentos ocorrer a jusante da barragem, sem necessidade de local de armazenamento.

Todavia, os resultados adquiridos revelam a ineficácia desta técnica devido à obstrução da secção da canalização, por insuficiente velocidade de escoamento. A base deste problema está na baixa diferença de carga hidráulica entre as extremidades, existente nos ensaios realizados. O comprimento da canalização influencia igualmente os resultados da medida, dado que a maiores comprimentos estão associadas maiores perdas de carga contínuas.

Em suma, para um uso eficaz desta técnica, a sua aplicação deverá ser em barragens com elevados desníveis entre montante e jusante da mesma, e deve ser encontrado o equilíbrio entre a dimensão da secção transversal de escoamento da canalização e o seu comprimento.

7.2. Desenvolvimentos futuros

Devido à complexidade associada aos fenómenos de transporte sedimentar nos rios, o estudo da deposição em albufeiras não é de fácil realização. As técnicas de controlo e

mitigação da deposição, em reservatórios, são técnicas de elevada complexidade de operação. Acrescendo a este facto, as limitações existentes no laboratório, tornam árdua a execução do respectivo estudo. Realizado o presente trabalho, ficam alguns aspectos que carecem de algum aprofundamento.

Na avaliação do transporte e deposição sedimentar, seguindo a mesma metodologia de ensaios, será de algum interesse a utilização de uma areia com uma granulometria mais extensa, de modo a obter uma melhor identificação das zonas de deposição das diferentes gamas de sedimentos, verificadas em situações reais. Desta forma, os impactos gerados pela variação das condições de escoamento serão, eventualmente, mais explícitos e diferenciáveis. A avaliação das alterações na distribuição dos sedimentos, provocada por uma alimentação mais lenta, ou faseada, poderá ser igualmente um aspecto interessante a ter em conta. No futuro, podia-se desenvolver um sistema que permita, no canal, a obtenção de um leito revestido de sedimentos, não descorando a alimentação de areias pelo exterior.

Na investigação levada a cabo neste trabalho, os ensaios de avaliação dos impactos da forma da albufeira, bem como da menor inclinação do leito, geraram escoamentos sem formação de ressalto hidráulico nos limites do canal. Este facto não permitiu uma análise exaustiva do comportamento dos sedimentos antes e logo após a entrada dos mesmos nos limites da albufeira. Em estudos futuros, deve-se otimizar as condições base do ensaio padrão, de modo a gerar um ressalto hidráulico localizado mais a jusante no canal. Isto permitiria que houvesse mais espaço de regressão do ressalto hidráulico, quando alteradas as condições de escoamento líquido.

De forma a obter uma melhor precisão na avaliação das medidas de mitigação da sedimentação em reservatórios, pode-se tentar o aperfeiçoamento das técnicas usadas em laboratório. Nos ensaios de lavagem de sedimentos, com especial incidência na lavagem com rebaixamento, deverá definir-se um tempo óptimo de aplicação da técnica, bem como condições de escoamento líquido padrão da primeira fase do ensaio, que proporcionem a acumulação de areias mais a jusante no canal, para posterior remoção. Esta última recomendação aplica-se igualmente para a técnica de *sluicing*. Ainda no que respeita ao *sluicing*, dever-se-á verificar a possibilidade de instalação de outro género de canalização, com características que facilitem a passagem de sedimentos, ao invés da acumulação destes ao longo do percurso.

O impacto causado pela variação das condições de escoamento líquido, também poderá ser algo interessante a avaliar, uma vez que permitiria definir as melhores condições para aplicação de cada técnica. Tal como nos ensaios de transporte e deposição, também nas

medidas de mitigação, a utilização de uma areia de granulometria extensa, definiria a gama de sedimentos em que cada medida é eficaz.

Deverá ser tida em conta a possibilidade de aplicação de técnicas de *pass-through*, descritas na revisão bibliográfica. Para tal, a operação da barragem em conjunto com o controlo do caudal sólido e líquido afluente, poderão ser eficazes na redução da deposição de sedimentos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Agency, U. E. P. (1994). *ARCS Remediation Guidance Document: 4. Removal Technologies* US Environmental Protection Agency, Great Lakes National Program Office, Chicago. Documento Governamental.
2. Armanini, A., Dellagiacomma, F. e Ferrari, L. (1991). *From the check dam to the development of functional check dams Fluvial Hydraulics of Mountain Regions*. Aronne Armanini and Giampaolo Di Silvio. Springer Berlin / Heidelberg. Secção de livro, 37 **37**: págs 331-344.
3. Bashar, K., ELTahir, E., Fattah, S., Ali, A., Musnad, M. e Osman, I. (2010). *Nile Basin Reservoir Sedimentation Prediction and Mitigation*, NBCBN-RE: págs 5 - 13.
4. Batuca, D. e Jordaan, J. (2000). *Silting and Desilting of Reservoirs*. A.A. Balkema, Rotterdam. Livro: 357 págs.
5. Bellal, M., Spinewine, B., Savary, C. e Zech, Y. (2003). *Morphological Evolution of Steep-sloped River Beds in the Presence of a Hydraulic Jump: Experimental Study*. XXX Congress IAHR International Association of Hydraulic Engineering and Research, Aristotle University of Thessaloniki, Greece. Artigo de conferência: págs 133 - 140.
6. Carvalho, N., Júnior, N., Santos, P. e Lima, J. (2000). *Guia de Avaliação de Assoreamento de Reservatórios*. Agência Nacional de Energia Eléctrica - ENEEL. Documento não publicado: 107 págs.
7. Cesare, G., Schleiss, A. e Hermann, F. (2001). *Impact of Turbidity Currents on Reservoir Sedimentation*. Journal of Hidraulic Engineering **127**(1): págs 6-16.
8. Coelho, C., Conceição, T. e Ribeiro, B. (2009). *Coastal erosion due to anthropogenic impacts on sediment transport in Douro river - Portugal*. Impacts of Human Activities on Dynamic Coastal Processes, Tóquio, Japão. Artigo de conferência: 15 págs.
9. Coker, E., Hotchkiss, R. e Johnson, D. (2009). *Conversion of a Missouri River Dam and Reservoir to a Sustainable System: Sediment Management*. Journal of the American Water Resource **45**(4): págs 815-827.
10. Conceição, T. (2008). *Impacto das Acções Antropogénicas no Comportamento Sedimentar do Rio Douro*. Universidade de Aveiro, Departamento de Engenharia Civil, Aveiro. Tese de Mestrado: 46 págs.
11. Dewals, B., Rulot, F., Erpicum, S., Archambeau, P. e Piroton, M. (2010). *Long-term sediment management for sustainable hydropower*. Comprehensive Renewable Energy. Volume 6 - Hydro Power. A. Sayigh. Elsevier, Oxford. Secção de livro: 42 págs.

12. Durgunoglu, A. e Singh, K. (1993). *The Economics of Using Sediment-Entrapment Reduction Measures in Lake and Reservoir Design*. Water Research Center. Urbana, University of Illinois at Urbana-Champaign: 58 págs.
13. Emamgholizadeh, S., Bina, M., Fathi-Moghadam, M. e Ghomeyshi, M. (2006). *Investigation and evaluation of the pressure flushing through storage reservoir*. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences **1**(4): págs 7-16.
14. Faria, F. (2003). *O Sistema Electroprodutor da EDP*. Museu de Electricidade /EDP. Documento não publicado: 14 págs.
15. Ferreira, D. (2010). *Estudo do assoreamento em albufeiras*. Universidade de Aveiro, Departamento de Engenharia Civil, Aveiro. Tese de Mestrado: 74 págs.
16. Fonseca, R. (2002). *Impactos ambientais associados a barragens e a albufeiras. Estratégia de re-aproveitamento dos sedimentos depositados*. Dams: Impacts and Hazards, Évora, Portugal. Artigo de conferência: págs 17-24.
17. Garcia, M. (2007). *Sedimentation Engineering. Processes, Measurements, Modeling, and Practice*. ASCE, Virginia. Livro: 1132 págs.
18. Girard, P. (2002). *Efeito Cumulativo das Barragens no Pantanal*. Instituto Centro Vida. Documento não publicado: 28 págs.
19. Lameiro, L. e Taveira-Pinto, F. (2009). *Avaliação da Sedimentação em Albufeiras e Técnicas de Transposição e Reutilização dos Sedimentos*. 4.^{as} Jornadas Hidráulicas, Recursos Hídricos e Ambiente, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto. Artigo de conferência: págs 119-129.
20. Lencastre, A. e Franco, F. (1992). *Lições de Hidrologia*, Monte da Caparica. Livro.
21. McCartney, M. (2009). *Living with dams: managing the environmental impacts*. Water Policy: Official Journal of the World Water Council **11**(Supplement 1): págs 121-139.
22. Morris, G. e Fan, J. (1997). *Reservoir Sedimentation Handbook*. McGraw-Hill Companies, Inc., New York. Livro: 848 págs.
23. Palmieri, A., Shah, F., Annandale, G. e Dinar, A. (2003). *Reservoir Conservation. Volume I: The RESCON Approach* Economic and engineering evaluation of alternative strategies for managing sedimentation in storage reservoirs. Washington, The International Bank for Reconstruction and Development: 101 págs.
24. Pritchard, B. (2010). *Los Angeles County area debris basin*. de http://commons.wikimedia.org/wiki/File:FEMA_-_44847_-_Los_Angeles_County_area_debris_basin.jpg
25. Ribeiro, B. (2009). *Efeito das Barragens no Transporte Sedimentar Fluvial*. Universidade de Aveiro, Departamento de Engenharia Civil, Aveiro. Tese de Mestrado: 82 págs.

26. Ribeiro, B. e Coelho, C. (2009). *Efeito das Barragens no Transporte Sedimentar Fluvial*. 1º Seminário sobre Gestão de Bacias Hidrográficas, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto. Artigo de conferência: 9 págs.
27. Rocha, J. (1998). *O assoreamento das albufeiras e o ambiente*. Seminário de barragens e ambiente, Porto. Artigo de conferência.
28. Shahmirzadi, M., Dehghani, A., Sumi, T., Mosaedi, A. e Meftah, M. (2010). *Experimental Investigation of Pressure Flushing Technique in Reservoir Storages*. Water and Geocience, Cambridge, WSEAS Press. Artigo de conferência.
29. Shen, H. e Janssen, R. (1999). *Keynote lecture: Flushing sediment through reservoirs*. River Sedimentation: Theory and Applications. A. W. Jayawardena, J. H. W. Lee and Z. Y. Wang. A.A. Balkema, Rotterdam. Secção de livro: 10 págs.
30. Sloff, C. (1991). *Reservoir sedimentation: a literature survey*. Communications on hydraulic and geotechnical engineering, Faculty of Civil Engineering, Delf University Technology: 125 págs.
31. Stole, H. (2008). *Material de apoio às aulas de Headworks and Sedimentation*. Universidade Norueguesa de Ciência e Tecnologia. Documento não publicado.
32. Vanoni, V. (2006). *Sedimentation Engineering*. American Society of Civil Engineers - ASCE, Virginia. Livro: 418 págs.
33. Wang, Z.-y. e Hu, C. (2009). *Strategies for managing reservoir sedimentation*. International Journal of Sediment Research **24**(4): págs 369-384.
34. White, R. (2001). *Evacuation of sediments from reservoirs*. Thomas Telford Publishing, Londres. Livro: 260 págs.
35. Yang, C. (2006). *Erosion and Sedimentation Manual*. U. S. Department of the interior - Bureau of Reclamation, Documento Governamental.

ANEXOS

Anexo I: Tempo de ensaio

Anexo II: Erro

Anexo II: Ensaios de transporte e deposição sedimentar

Anexo IV: Ensaios de lavagem de sedimentos

ANEXO I – TEMPO DE ENSAIO

Tabela 10. Valores da distribuição das areias ao longo do canal, para os diferentes tempos de ensaio.

Trecho	d _{descarregador} (m)	X _g secção (m)	Massa (g)						
			PT10	PT30	PT60	PT120	PT240	PT480	PT1440
T ₁	0.50	0.25	1.07	0.58	0.57	1.03	1.50	2.46	6.29
T ₂	1.00	0.75	1.07	0.58	0.57	1.03	1.50	2.46	6.29
T ₃	1.50	1.25	1.07	0.58	0.57	1.03	1.50	2.46	6.29
T ₄	2.00	1.75	1.07	0.58	0.57	1.03	1.50	2.46	6.29
T ₅	2.50	2.25	1.07	0.58	0.57	1.03	1.50	2.46	6.29
T ₆	3.00	2.75	1.07	0.58	0.57	1.03	1.50	2.46	6.29
T ₇	3.50	3.25	1.07	0.58	0.57	1.03	1.50	2.46	6.29
T ₈	4.00	3.75	1.07	0.58	0.57	1.03	1.50	2.46	6.29
T ₉	4.50	4.25	1.07	0.58	0.57	1.03	1.50	2.46	6.29
T ₁₀	5.00	4.75	2.05	5.93	14.80	33.03	14.30	19.30	307.10
T ₁₁	5.50	5.25	2.05	5.93	14.80	33.03	37.70	216.80	2813.30
T ₁₂	6.00	5.75	2.05	5.93	14.80	33.03	291.40	2149.20	1837.50
T ₁₃	6.50	6.25	26.59	97.70	129.30	799.20	2211.70	2321.80	930.40
T ₁₄	7.00	6.75	77.17	733.90	1638.50	2319.90	2188.50	1052.90	47.60
T ₁₅	7.50	7.25	919.55	2818.20	2548.70	1597.90	720.80	115.70	1.10
T ₁₆	8.00	7.75	3661.86	1791.00	1214.60	935.00	481.20	61.20	0.00
T ₁₇	8.50	8.25	1233.16	504.50	388.10	239.60	33.20	38.50	0.00
T ₁₈	9.00	8.75	1.35	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
T ₁₉	9.40	9.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Massa _{total} (g)			5935.44	5968.30	5968.70	6000.00	5992.30	5997.50	5993.60
X _g total (m)			7.75	7.40	7.24	7.00	6.64	6.15	5.52

ANEXO II – ERRO

Tabela 11. Valor da distribuição das areias e do erro, em massa e em percentagem, ao longo do canal, para os ensaios PT60 e PT602.

Trecho	$d_{\text{descarregador}}$ (m)	X_g secção (m)	Massa (g)		Erro	
			PT60	PT602	Massa (g)	%
T ₁	0.50	0.25	0.57	1.03	0.47	82.35
T ₂	1.00	0.75	0.57	1.03	0.47	82.35
T ₃	1.50	1.25	0.57	1.03	0.47	82.35
T ₄	2.00	1.75	0.57	1.03	0.47	82.35
T ₅	2.50	2.25	0.57	1.03	0.47	82.35
T ₆	3.00	2.75	0.57	1.03	0.47	82.35
T ₇	3.50	3.25	0.57	1.03	0.47	82.35
T ₈	4.00	3.75	0.57	1.03	0.47	82.35
T ₉	4.50	4.25	0.57	1.03	0.47	82.35
T ₁₀	5.00	4.75	14.80	14.80	0.00	0.00
T ₁₁	5.50	5.25	14.80	14.80	0.00	0.00
T ₁₂	6.00	5.75	14.80	14.80	0.00	0.00
T ₁₃	6.50	6.25	129.30	161.70	32.40	25.06
T ₁₄	7.00	6.75	1638.50	1653.80	15.30	0.93
T ₁₅	7.50	7.25	2548.70	2427.60	121.10	4.99
T ₁₆	8.00	7.75	1214.60	1255.90	41.30	3.40
T ₁₇	8.50	8.25	388.10	438.50	50.40	12.99
T ₁₈	9.00	8.75	0.00	0.00	0.00	0.00
T ₁₉	9.40	9.20	0.00	0.00	0.00	0.00
Massa _{total} (g)			5968.70	5991.20		
$X_{g \text{ total}}$ (m)			7.24	7.24		

ANEXO III – ENSAIO DE TRANSPORTE E DEPOSIÇÃO SEDIMENTAR

Tabela 12. Valores da distribuição das areias ao longo do canal, para os ensaios de transporte e deposição sedimentar.

Trecho	$d_{\text{descarregador}}$ (m)	X_g secção (m)	Massa (g)									
			PD750	PQ3.65	PQ6.28	PQ11.67	PQ14.76	PI1.75	PI0.25	PF1	PF2	PC
T ₁	0.50	0.25	0.87	0.12	1.12	1.87	4.76	1.93	0.55	0.00	0.16	0.67
T ₂	1.00	0.75	0.87	0.12	1.12	1.87	4.76	1.93	0.55	0.00	0.16	0.67
T ₃	1.50	1.25	0.87	0.12	1.12	1.87	4.76	1.93	0.55	0.00	0.16	0.67
T ₄	2.00	1.75	0.87	0.12	1.12	1.87	4.76	10.20	0.55	0.00	0.16	0.67
T ₅	2.50	2.25	0.87	0.12	1.12	1.87	4.76	54.50	0.55	0.00	0.16	0.67
T ₆	3.00	2.75	0.87	5.40	1.12	1.87	4.76	404.60	0.55	0.00	0.16	0.67
T ₇	3.50	3.25	0.87	5.40	1.12	1.87	4.76	3596.00	0.55	0.00	0.16	0.67
T ₈	4.00	3.75	0.87	5.40	1.12	1.87	4.76	1563.60	0.55	0.00	0.16	0.67
T ₉	4.50	4.25	0.87	322.70	1.12	1.87	4.76	359.50	0.55	0.00	0.16	0.67
T ₁₀	5.00	4.75	8.17	3389.40	22.80	16.43	26.40	1.00	0.55	0.00	0.16	11.07
T ₁₁	5.50	5.25	8.17	1512.50	301.50	16.43	95.00	0.00	0.55	0.00	0.16	11.07
T ₁₂	6.00	5.75	8.17	742.40	3472.80	16.43	378.30	0.00	0.55	0.00	0.16	11.07
T ₁₃	6.50	6.25	26.70	4.40	1742.90	340.00	2158.50	0.00	0.55	11.58	10.27	108.90
T ₁₄	7.00	6.75	1800.90	0.00	443.00	2320.50	2297.70	0.00	0.55	11.58	10.27	1293.00
T ₁₅	7.50	7.25	2596.50	0.00	4.20	2292.80	995.20	0.00	0.55	11.58	10.27	2683.10
T ₁₆	8.00	7.75	1212.10	0.00	0.00	967.10	0.00	0.00	6.80	11.58	149.10	1353.60
T ₁₇	8.50	8.25	324.00	0.00	0.00	6.30	0.00	0.00	40.10	434.50	2893.40	483.70
T ₁₈	9.00	8.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2925.00	5199.60	2871.80	0.00
T ₁₉	9.40	9.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3006.70	308.90	46.80	0.00
Massa _{total} (g)			5992.50	5988.20	5997.30	5992.80	5993.90	5995.20	5986.90	5989.30	5993.80	5961.50
x_g total (m)			7.24	4.97	5.94	7.05	6.53	3.39	8.96	8.72	8.48	7.30

ANEXO IV – ENSAIOS DE LAVAGEM DE SEDIMENTOS

Tabela 13. Valores da distribuição das areias ao longo do canal, para os ensaios de lavagem de sedimentos.

Trecho	$d_{\text{descarregador}}$ (m)	X_g secção (m)	Massa (g)					
			LRPQ3.65	LRP	LRPQ11.67	LEPQ3.65	LEP	LEPQ11.67
T ₁	0.50	0.25	0.38	1.04	1.39	30.40	2302.40	457.20
T ₂	1.00	0.75	0.38	1.04	1.39	2639.70	976.10	0.80
T ₃	1.50	1.25	0.38	1.04	1.39	2558.80	2.90	0.00
T ₄	2.00	1.75	0.38	1.04	1.39	746.60	0.00	0.00
T ₅	2.50	2.25	0.38	1.04	1.39	0.00	0.00	0.00
T ₆	3.00	2.75	17.35	8.50	1.39	0.00	0.00	0.00
T ₇	3.50	3.25	17.35	8.50	1.39	0.00	0.00	0.00
T ₈	4.00	3.75	2284.00	38.60	1.39	0.00	0.00	0.00
T ₉	4.50	4.25	2857.20	225.50	8.80	0.00	0.00	0.00
T ₁₀	5.00	4.75	818.20	2390.30	8.80	0.00	0.00	0.00
T ₁₁	5.50	5.25	0.00	3167.70	38.10	0.00	0.00	0.00
T ₁₂	6.00	5.75	0.00	48.80	132.90	0.00	0.00	0.00
T ₁₃	6.50	6.25	0.00	0.00	1154.50	0.00	0.00	0.00
T ₁₄	7.00	6.75	0.00	0.00	3490.60	0.00	0.00	0.00
T ₁₅	7.50	7.25	0.00	0.00	1153.70	0.00	0.00	0.00
T ₁₆	8.00	7.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
T ₁₇	8.50	8.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
T ₁₈	9.00	8.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
T ₁₉	9.40	9.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Massa _{total} (g)			5996.00	5893.10	5998.50	5975.50	3281.40	458.00
x_g total (m)			4.12	4.99	6.70	1.09	0.40	0.25